



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VODÍK JAKO AKUMULAČNÍ MÉDIUM

HYDROGEN AS A STORAGE MEDIU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Ventura

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Jan Ventura**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení Ve-
doucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vodík jako akumulční médium

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současný rozvoj obnovitelných zdrojů a zároveň rozvoj dopravy založené na elektromobilech přináší otázku řešení akumulace energie. Jednou z možností již standartně využívanou jsou baterie. Tato práce by se měla podívat na možnost akumulace elektřiny s využitím vodíku místo baterií. Smyslem je pokrytí rozdílu mezi výrobou z obnovitelných zdrojů a požadavků na nabíjení elektromobilů všech kategorií.

Cíle bakalářské práce:

Popište problematiku možnosti výroby vodíku z pohledu vlivu na životní prostředí.

Analyzujte možnosti skladování vodíku z pohledu kapacity, energetické náročnosti, bezpečnosti atd.

Porovnejte využití vodíku pro akumulaci přebytků z výroby elektřiny ve srovnání s akumulací do bateriových uložišť.

Analyzujte možnosti výroby elektřiny ze solární energie s její následnou akumulací do vodíku a jeho využití pro následné nabíjení elektromobilů.

Konstrukční návrh možného modulárního lokálního uložišť vodíku.

Seznam doporučené literatury:

BRESTOVIC, Tomas, Natalia JASMINSKA a Marian LAZAR. Metal hydride tank cooling at hydrogen absorption into the LaCeNi alloy. 1. Brussels: EuroScientia, 2017. ISBN 978-90-822990- 8-3.

SCIPIONI, Antonio, Alessandro MANZARDO a Ren JINGZHENG. Hydrogen economy: supply chain, life cycle analysis and energy transition for sustainability. 1. San Diego: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-811132-1.

GAVRILYUK, Alexander. Hydrogen energy for beginners. 1. Boca Raton: Pan Stanford Publishing, 2013. ISBN 978-981-4364-78-2.

STOLTEN, Detlef a Bernd EMONTS. Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology. 1. Weinheim: Wiley, 2016. ISBN 978-3-527-33238-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá různými způsoby výroby vodíku se zaměřením na ekologii jednotlivých metod. Zvláštní pozornost je pak věnována takzvanému modrému vodíku, který bývá prezentován jako jedna z ekologických variant získávání vodíku. Dále jsou shrnuty možnosti skladování vodíku se zaměřením na jejich energetickou náročnost, praktičnost a bezpečnost. Následně se práce zabývá srovnáním vodíkových a bateriových energetických úložišť. Toto srovnání je provedeno na základě efektivity jednotlivých metod a srovnání schopnosti dlouhodobého uchování velkých množství energie. Výsledkem této práce je vytvoření teoretického výpočtového modelu vodíkového akumulčního systému na základě dat výroby elektrické energie fotovoltaických panelů na budově C3 v areálu FSI VUT. Na základě tohoto modelu byly dále vybrány konkrétní komponenty pro sestavení tohoto systému a byl proveden přibližný cenový odhad a porovnání vodíkového a bateriového akumulčního systému. Dále bylo navrženo konstrukční řešení modulárního úložiště vodíku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, akumulace energie, ekologie, bezpečnost

ABSTRACT

This thesis focuses on various means of hydrogen production with focus on ecological side of each method. Closer attention is given to, so called, blue hydrogen that tends to be considered as one of the ecological ways of producing hydrogen. Next section focuses on hydrogen storage and their comparison based on efficiency, viability and security of each method. Aim is then directed towards comparison of hydrogen and battery energy storage. This comparison is based on efficiency and ability of each method to hold large amounts of energy for extended periods of time. Main outcome of this thesis is creation of theoretical computational model of hydrogen energy accumulation system based on data of energy production of C3 building of FME BUT complex. Based on outcome of this model, specific components were chosen for real life application and an approximate price estimation was made as well as comparison with equivalent battery energy storage. Final step was designing a modular hydrogen storage.

KEYWORDS

Hydrogen, energy accumulation, ecology, safety

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VENTURA, Jan. *Vodík jako akumulční médium*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Josef Štětina.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2023

.....

Jan Ventura

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat Jakubu Matějcovi za jeho rady při výběru komponent vodíkového akumulátoru a za řadu rad z praxe vodíkových akumulátorů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým blízkým za podporu při tvorbě této práce.

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 11 |
| 1 Problematika výroby vodíku z pohledu vlivu na životní prostředí | 12 |
| 1.1 O ekologii | 13 |
| 1.2 Šedý vodík | 14 |
| 1.3 Idea modrého vodíku | 15 |
| 1.3.1 Skutečný ekologický dopad modrého vodíku | 15 |
| 1.4 Černý/hnědý vodík..... | 19 |
| 1.5 Zelený vodík | 19 |
| 1.6 Bílý vodík | 20 |
| 1.7 Bio-vodík | 20 |
| 1.8 Další druhy..... | 21 |
| 2 Problematika skladování vodíku | 22 |
| 2.1 Stlačení..... | 23 |
| 2.2 Zkapalnění | 25 |
| 2.3 Metal hydridy..... | 26 |
| 2.4 Tvorba nových molekul: | 27 |
| 2.5 Bezpečnostní porovnání skladovacích metod..... | 28 |
| 3 Akumulace elektrické energie ve vodíku ve srovnání s bateriovým úložištěm | 30 |
| 3.1 Druhy akumulátorů | 31 |
| 3.1.1 Vodík | 31 |
| 3.1.2 Baterie..... | 32 |
| 3.1.3 Bezpečnostní porovnání baterií a vodíku | 33 |
| 3.1.4 Další druhy akumulátorů | 34 |
| 4 Reálná aplikace..... | 35 |
| 4.1 Vstupní data | 35 |
| 4.2 Předpoklady | 35 |
| 4.3 Použité komponenty | 35 |
| 4.4 Výpočty parametrů systému | 39 |
| 4.4.1 Vodíkový akumulační systém | 39 |
| 4.4.2 Bateriová úložiště | 42 |
| 4.5 Srovnání vodíkového a bateriového akumulátoru | 43 |
| 5 Modulární úložiště vodíku..... | 45 |
| 5.1 Úložný modul | 45 |
| 5.2 Zastřešovací modul | 47 |
| 5.3 Sestava | 48 |

| | | |
|---|--------------------|----|
| 6 | Závěr..... | 52 |
| 7 | Bibliografie..... | 54 |
| | Seznam příloh..... | 60 |

ÚVOD

Téměř ve všech odvětvích průmyslu je kladen stále větší důraz na ekologičnost veškerých prováděných procesů. Ve spojitosti s ekologií je stále více vyzdvihován potenciální budoucí přínos vodíku, ať už jako paliva nebo coby nosiče energie. Jelikož spalováním vodíku vzniká pouze nezávadná pára a jedná se navíc o nejběžnější prvek ve vesmíru, může být vodík někdy považován za zázračné palivo budoucnosti. Vodík je však možné získávat různými metodami, a právě mírou ekologičnosti těchto metod se zabývá první část této práce.

Jelikož je vodík zároveň nejmenším prvkem ve vesmíru, je jeho uskladnění velice problematickým tématem. Prvním problémem je, že vodík může mít schopnost prostoupit obalovým materiálem, a druhým problémem je jeho velice nízká hustota, kvůli které musí být vodík stlačen, zkapalněn, nebo jinak upraven. Tyto úpravy mohou být energeticky velice náročné a zvyšují tak ztráty celé vodíkové infrastruktury. Možnými způsoby uložení vodíku a jejich efektivností a bezpečností se zabývá další část této práce.

Perspektivní oblastí pro využití vodíku se zdá být akumulace energie. Akumulace energie je stále potřebnější, jelikož obnovitelné zdroje, jako jsou například fotovoltaické panely nebo větrné elektrárny, vnáší do elektrické sítě nárazové nárůsty energie. Tyto nárůsty v současné době vyrovnávají konvenční elektrárny spalující fosilní paliva. Není tedy možné tyto elektrárny pouze nahradit alternativními zdroji energie, jelikož tyto zdroje pro svoji efektivní integraci do elektrické sítě vyžadují fungující fosilní elektrárny.

Alternativou, jak tyto energetické špičky vyrovnat, je použití vhodných akumulátorů energie. Tyto akumulátory pojmou přebytečnou energii v době nízké spotřeby a vrátí ji do sítě v době, kdy spotřeba opět vzroste. Dalším možným krokem je pak vytvoření takzvaných sezónních energetických úložišť, která během letních měsíců energii akumulují a během zimních ji vpouštějí zpět do sítě.

V současnosti jsou nejvyužívanější formou akumulátorů bateriová úložiště, ta ovšem nejsou vhodná pro dlouhodobé uchování energie. Cena za uskladněnou kWh energie je navíc příliš vysoká pro použití ve vysokokapacitních aplikacích. Stále se tedy hledá vhodná alternativa, která by mohla co nejefektivněji uchovávat velké množství energie po dobu měsíců, případně i let.

Takovou alternativou by mohl být právě vodík. Ten by nebyl využíván přímo jako palivo, ale coby pouhý nosič energie. V době přebytku by byl pomocí elektrolyzérů vyráběn vodík a v době nedostatku by pomocí palivového článku byla z vodíku vyráběna elektřina. Při použití vhodné metody uskladnění může být vodík uchováván po téměř neomezeně dlouhou dobu a je tak možné ho využít i coby sezónní úložiště energie.

Výslednou částí této práce je potom návrh akumulátoru energie pro FSI VUT určeného k nabíjení elektromobilů a konstrukční návrh modulárního úložiště vodíku.

1 PROBLEMATIKA VÝROBY VODÍKU Z POHLEDU VLIVU NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

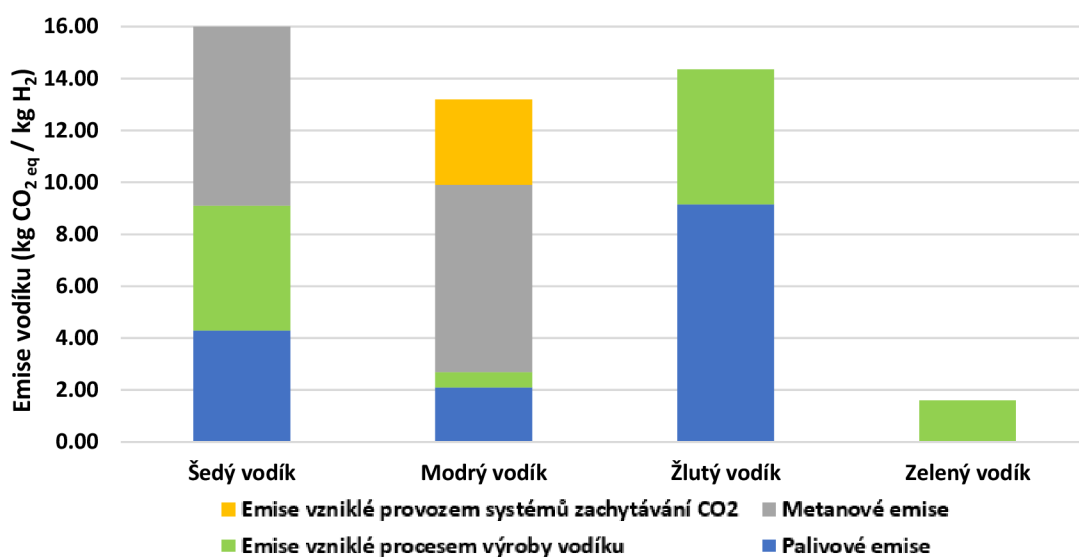
Vodík je prvek tvořený jedním protonem a jedním elektronem. Předpokládá se, že vodík je nejběžnějším prvkem ve vesmíru. V přírodě se však nejčastěji vyskytuje vázaný ve vodě nebo ve fosilních palivech, čistý vodík nejčastěji najdeme v podobě molekuly H₂. Tato H-H vazba obsahuje neobvykle velké množství energie (436 kJ/mol). Další běžnou molekulou s takovýmto množstvím energie je kyslík O₂ (498,4 kJ/mol). [1]



Z rovnice (1) je jasné, proč má vodík potenciál být skvělým palivem. Při spalování vodíku totiž vzniká velké množství energie a jediným produktem této reakce je ekologicky nezávadná voda. Vzhledem k velkému množství energie obsaženému v malém hmotnostním množství vodíku, je jeho přímé spalování nejčastěji používané k pohonu vícestupňových raket [1]. Ačkoliv má vodík velkou hmotnostní energetickou hustotu (až 141,8 MJ/kg) v porovnání například s benzínem (44 MJ/kg), tak má ovšem zároveň velmi malou objemovou energetickou hustotu (8 MJ/l) ve srovnání s benzínem (32 MJ/l) [2]. V průmyslu je vodík využíván především k rafinačním procesům, výrobě čpavku pro hnojiva, metanolu a v procesu zpracování železa a oceli [3]. Mezi odvětví, kde narůstá využití vodíku, je pak dálková přeprava, a to jak letecká a lodní, tak i nákladní silniční [4]. Dalším novým využitím vodíku je zpracování oceli, kde se pracuje na nahrazení nejčastěji používaného paliva, zemního plynu, vodíkem [4].

Jelikož vodík není běžně těžen přímo ve své čisté formě je nutné ho získat z některé z molekul ve kterých je vázaný. Existuje mnoho zdrojů, kde vázaný vodík hledat a mnoho způsobů, jak z těchto zdrojů vodík získávat. Pro přehlednost byla dohodnuta barevná škála vodíku rozlišující vodík podle jeho zdroje a zdroje energie pro reformaci vodík obsahujících molekul [2].

Pro vodík získaný z vody použitím elektrolyzy, která je poháněna elektrinou pouze z obnovitelných zdrojů je používáno označení **zelený** vodík. Pokud pro elektrolyzu použijeme elektrinu získanou z jaderných elektráren pak získáme **fialový** vodík. V případě, že je pro elektrolyzu použita energie přímo z elektrické sítě, jedná se o vodík **žlutý**. Když je vodík získávaný ze zemního plynu, pak je označován za **šedý** vodík. Pokud je při výrobě šedého vodíku zachytávána alespoň část vypouštěných skleníkových plynů, potom se jedná o **modrý** vodík. Při použití černého či hnědého uhlí získáme **černý** či **hnědý** vodík. Velké množství vodíku vzniká také jako odpadní materiál při různých chemických procesech, pokud je takovýto vodík zachycen, mluvíme o **bílém** vodíku. Další možností, jak získávat vodík, je z biomasy, takový vodík je pak označován jako **biovodík**. Na obrázku 1 pak můžeme pozorovat emisní porovnání šedého, modrého, žlutého a zeleného vodíku. [5]



Obr. 1 Emise vzniklé při různých způsobech výroby vodíku

[5]

1.1 O EKOLOGII

Při hodnocení míry ekologické náročnosti daného způsobu výroby vodíku bude v této práci nejčastěji přihlíženo k druhu a množství skleníkových plynů vypouštěných v celém procesu výroby vodíku. Míra potence jednotlivých skleníkových plynů je standardně udávána za dobu 100 let, tedy jak moc se daný plyn podílí na skleníkovém efektu v horizontu 100 let od jeho vypuštění do atmosféry [6].

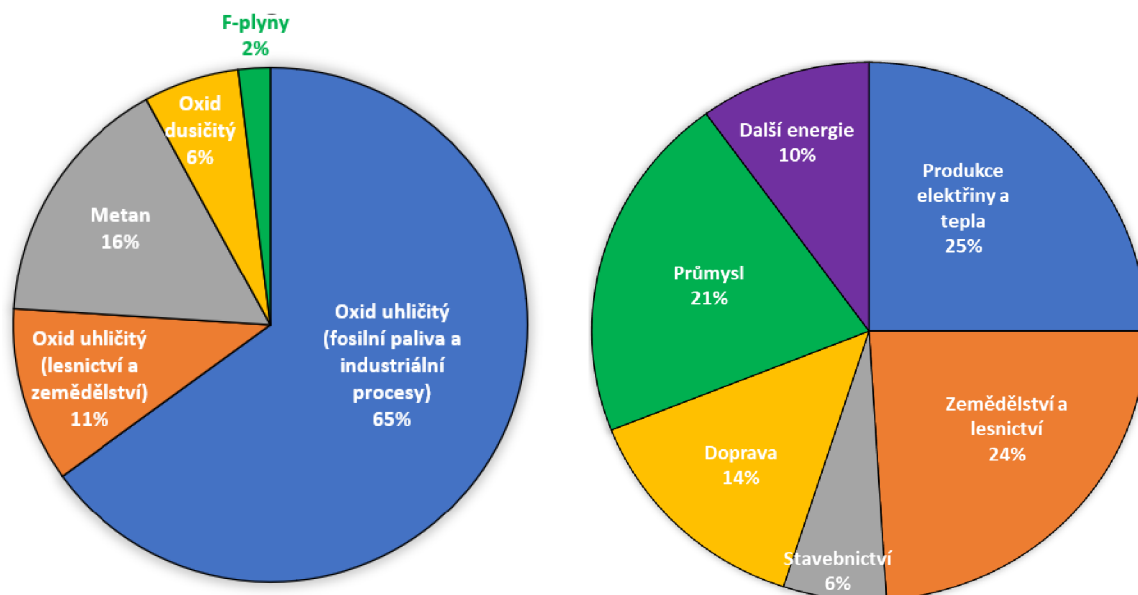
Oxid uhličitý v roce 2020 tvořil 76 % [7] všech vypuštěných skleníkových plynů a je tedy považován za benchmark při porovnávání potence jiných plynů, jeho hodnota GWP (Global Warming Potential) je tedy 1 [6]. Další skleníkové plyny jsou hodnoceny podle toho, kolikrát jsou horší, či lepší než oxid uhličitý [6]. Rozpad oxidu uhličitého v atmosféře je součástí komplexního procesu zvaného globální uhlíkový cyklus [8]. Část uhlíku je rychle vstřebána oceány a rostlinami, část ho až po tisíce let zůstává v atmosféře vlivem pomalého procesu ukládání CO₂ do oceánského sedimentu [8].

Metan je druhým nejčastějším skleníkovým plynem, který v roce 2020 představoval 16 % [7] všech vypuštěných skleníkových plynů. Problematika metanu spočívá v jeho vysoké agresivitě a krátkém poločasu rozpadu – poločas rozpadu metanu v atmosféře je pouhých 12 let [8]. Použití 100letého modelu tedy dostatečně neodráží důležitost metanu jako skleníkového plynu, jelikož po většinu těchto 100 let je jeho množství v atmosféře téměř zanedbatelné. Při použití 100letého měřítka odpovídá 1 gram metanu 25 gramům oxidu uhličitého [8], ovšem při použití 20letého měřítka je 1 gram metanu ekvivalentem 86 gramů oxidu uhličitého [9]. Vzhledem ke globálním ekologickým cílům zaměřeným na změnu v horizontu pouhých pár desítek let dává smysl upustit od používaného 100letého modelu a přejít na bezprostřednější 20letý model. Vlivem neustálého používání 100letého modelu byl totiž bezprostřední vliv metanu na globální oteplování výrazně zanedbáván.

Na obrázku 2 je zobrazen poměr nejběžnějších skleníkových plynů. **Oxid dusičitý** N₂O se v atmosféře vyskytuje po dobu 114 let a jeho 100letý GWP je 298 [8]. Největším jeho zdrojem je používání syntetických a organických hnojiv [8]. **Fluorované skleníkové plyny** (nebo také F-plyny) jsou těmi nejagresivnějšími skleníkovými plyny, jelikož v atmosféře přetrvávají

stovky až tisíce let a jejich GWP je pohybuje v rozmezí od 12 000 do 22 000 [8]. Nejčastěji jsou používány jako náhrada za plyny poškozující ozonovou vrstvu, jež se využívají zejména v chladicích zařízeních [8].

Na obrázku 2 je dále znázorněn podíl vyprodukovaných emisí skleníkových plynů podle ekonomického sektoru. Implementace vodíku může snížit emise zejména v energetickém, dopravním či průmyslovém sektoru.

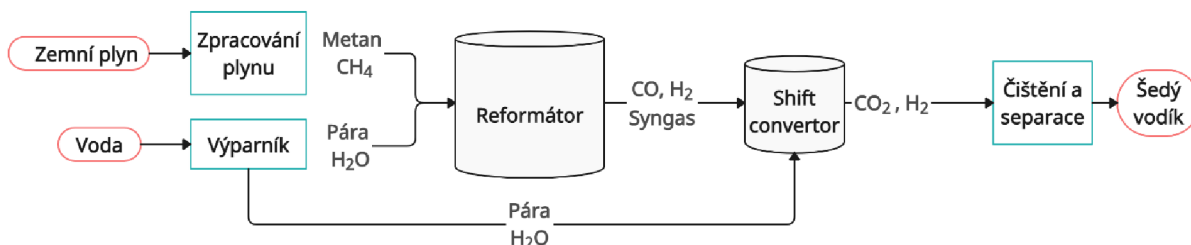


Obr. 2 Globální emise skleníkových plynů rozdělené podle druhu plynu a ekonomického sektoru [7]

1.2 ŠEDÝ VODÍK

Šedý vodík vzniká parní reformací metanu, získaného ze zemního plynu. Metan tvoří přibližně 70–90 % směsi zemního plynu [10]. Jedná se tedy o molekulu, které je velké množství, a jejíž získávání není příliš náročné. Metan je tudíž velice dostupným a levným plynem. Jedinou další vstupní složkou parní reformace metanu je pára, další velmi levná surovina [5]. Jelikož je výroba vodíku parní reformací aplikována na velkém měřítku již desítky let a protože její vstupní složky jsou relativně levné, pak je takto vyprodukovaný vodík v současnosti bezkonkurenčně nejlevnější a tím pádem i nejpoužívanější variantou [5]. Do kategorie šedého vodíku jsou často zařazovány i černý, hnědý a bílý vodík [5]. V součtu se odhaduje, že šedý vodík tvoří až 96 % celkové světové produkce vodíku [9].

Reakce probíhá tak, že kolem molekuly metanu (tvořené jedním atomem uhlíku a čtyřmi atomy vodíku) se vyskytuje mnoho molekul páry. Pára je tvořena jedním atomem kyslíku se dvěma atomy vodíku. Zvýšená teplota potom vede k tomu, že se vodíky obou molekul odpojí a volný uhlík se následně sváže s volným atomem kyslíku, čímž vytvoří oxid uhelnatý CO, zatímco volné atomy vodíku se sváží do molekul H₂. Tato směs, nazývaná syngas, následně putuje do shift convertoru kde je s další párou a z oxidu uhelnatého se stává oxid uhličitý CO₂ za vzniku dalších molekul vodíku. Ve výsledku tak z jedné molekuly metanu a dvou molekul vody vznikne jedna molekula oxidu uhličitého a 4 molekuly vodíku. [5]

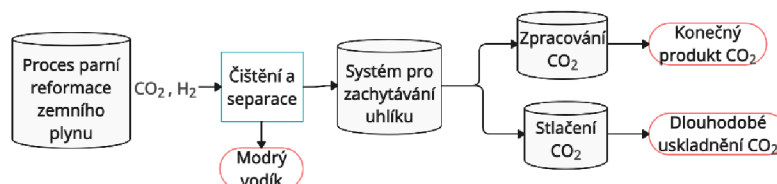


Obr. 3 Schéma procesu parní reformace zemního plynu [5]

V ideálním případě by tak výslednými produkty této reakce byl čistý vodík a oxid uhličitý. Jelikož ale tato reakce není dokonalá, tak kromě těchto dvou produktů odchází do atmosféry i metan [5]. Jak již bylo zmíněno, metan je často zanedbávaným, ale zároveň velice silným skleníkovým plynem. Dalším často přehlíženým ekologicky potencionálně problematickým aspektem tohoto procesu je velká spotřeba vody - na výrobu 1 kilogramu šedého vodíku je totiž nutné použít až 24 litrů vody [5].

1.3 IDEA MODRÉHO VODÍKU

Modrý vodík vzniká stejným způsobem jako jeho šedá varianta, ovšem s tím rozdílem, že uhlík vzniklý při parní reformaci je následně zachycován. Tento zachycený uhlík může být uskladněn pod zemí, a nebude tedy dále přispívat ke skleníkovému efektu. Alternativou je potom využití zachyceného uhlíku ve výrobě dalších produktů. [5]



Obr. 4 Schéma zpracování CO₂ při výrobě modrého vodíku [5]

1.3.1 SKUTEČNÝ EKOLOGICKÝ DOPAD MODRÉHO VODÍKU

Skutečným ekologickým dopadem modrého vodíku se zabývá studie „How green is blue hydrogen“ od Roberta W. Howartha a Marka Z. Jacobsona z roku 2021 [9]. V této kapitole bude tato studie shrnuta. V době tvorby této studie byly na světě v provozu pouze dvě továrny na modrý vodík, množství dostupných dat tedy nebylo příliš velké a je tedy možné, že v budoucnu budou reálné hodnoty vypouštěných skleníkových plynů výrazně sníženy. Tato studie se ovšem zabývá i teoretickým příkladem kdy by bylo vypouštěno minimální množství skleníkových plynů a i z tohoto ideálního příkladu je možné vyvodit jasné závěry. Pro výpočty v této studii je použit 20letý GWP, který dostatečně zohledňuje výrazný negativní vliv metanu, jenž bývá často opomíjen. Konečné výsledky této studie jsou shrnuty v tabulce 1.

Jak již bylo zmíněno v rovnicích 2 a 3, při parní reformaci vchází do reakce 1 mol metanu a vychází z ní 1 mol CO₂ a 4 moly H₂. Vzhledem k tomu, že 1 mol vodíku obsahuje 0,286 MJ energie nebo 3,5 molu vodíku obsahují 1 MJ, můžeme potom vytvořit následující rovnice.

$$3.5 \frac{\text{mol } H_2}{\text{MJ}} * \frac{1 \text{ mol } CO_2}{4 \text{ moly } H_2} = 0,875 \quad \text{molů } CO_2 \text{ na MJ [9]} \quad (4)$$

$$3.5 \frac{\text{mol } H_2}{\text{MJ}} * \frac{1 \text{ mol } CH_4}{4 \text{ moly } H_2} = 0,875 \quad \text{molů } CH_4 \text{ na MJ [9]} \quad (5)$$

Z rovnice 4 vyplývá, že z reakce odchází 0,875 molů CO_2 na každý MJ energie uložené ve vyrobeném vodíku. To se při molární hustotě CO_2 44,01 g/mol rovná **38,51 g CO_2** vypuštěných při výrobě 1 MJ vodíku. Z rovnice 5 potom vyplývá, že do reakce vstupuje 0,875 molů metanu, tedy **14,04 gramů metanu** na výrobu 1 MJ vodíku.

Jelikož je parní reformace endotermickou reakcí, je nutné do reakce dodávat velké množství energie pro dosažení vysokých teplot a tlaků. Tato energie je zpravidla získávána spalováním zemního plynu (metanu). Udávaná hodnota je 2,25 kWh na m^3 vodíku, což odpovídá 0,1814 MJ na 1 mol vodíku. Vzhledem k tomu, že při spalování metanu uniká 50 g CO_2 na 1 MJ vytvořené energie vznikají následující rovnice.

$$0,1814 \frac{\text{MJ}}{\text{mol } H_2} * 50g \frac{CO_2}{\text{MJ}} = 9,7 \quad g \frac{CO_2}{\text{mol } H_2} \quad [9] \quad (6)$$

$$9,7g \frac{CO_2}{\text{mol } H_2} * 3,5 \frac{\text{mol } H_2}{\text{MJ}} = 31,8 \quad g \frac{CO_2}{\text{MJ}} \quad [9] \quad (7)$$

Z rovnice 7 vyplyne, že pro výrobu 1 MJ vodíku je nutné vyprodukovat dalších **31,8 g CO_2** jen pro udržení parní reformace v chodu. Navíc je tak spotřebováno dalších **11,6 gramů metanu** pro výrobu 1 MJ vodíku. V době psaní studie nebyla ani u jedné z továren na modrý vodík vynaložena žádná snaha o zachycení skleníkových plynů z tohoto dodatečného spalování zemního plynu. Po sečtení hodnot vyvstává závěr, že při výrobě šedého vodíku bez jakýchkoliv zachycujících technologií vzniká **70,3 g CO_2** . Dále je pak uvažováno, že při těžbě, úpravě a přepravě zemního plynu vzniká přibližně 7,5 % dodatečných emisí v porovnání s emisemi vzniklými konečnými reakcemi plynu. To je v našem případě dalších **5,3 g CO_2** . Pokud jde o metan tak tato studie vychází z 20 studií z 10 různých plynárenských oborů a počítá s předpokládaným únikem metanu při těžbě, výrobě, přepravě a konečné reakci kolem **3,5 %** konečného množství spotřebovaného metanu. V tomto případě bylo dohromady spotřebováno 25,6 g metanu a vypuštěno tedy bylo kolem **0,9 g metanu** na MJ vodíku. 20leté GWP pro metan je 86, tedy 0,9 g metanu odpovídá **77,4 g CO_{2eq}** . Dohromady je potom celková ekvivalentní produkce oxidu uhličitého **153 g CO_{2eq}** na MJ šedého vodíku.

Jak již bylo zmíněno, ve skutečných továrnách na modrý vodík je zachytáváno pouze CO_2 vzniklé chemickými reakcemi přímo při parní reformaci, zatímco CO_2 ze spalování zemního plynu je ignorováno. V těchto továrnách je tedy produkce CO_2 snížena z 38,5 g na **5,8 g** na MJ vodíku. Další emise ovšem vznikají provozem systémů pro zachytávání CO_2 , které pro svoji funkci potřebují elektřinu, jež je vyráběna opět spalováním zemního plynu, při čemž nejsou zachycovány žádné emise. Po provedení ekvivalentních výpočtů, jako je tomu v rovnicích 6 a 7, dojdeme k závěru, že pro provoz zachytávacích systémů CO_2 pouze pro parní reformaci jsou spotřebovány **3 g metanu**, a tím pádem unikne kolem **9,5 g CO_{2eq}** a zároveň při tomto procesu unikne **8,2 g CO_2** což je ve výsledku nárůst o **17,7 g CO_{2eq}** způsobený provozem technologií pro zachytávání CO_2 . Při sečtení veškerých hodnot vyplývá, že z reálných továren na modrý vodík vychází **139 g CO_{2eq}** .

Za předpokladu, že by byly zachytávány i emise ze spalování zemního plynu pro provoz reakce, klesne produkce CO₂ při spalování z 31,8 g na **11,1 g** na MJ vodíku. Celkové emise CO₂ ze spalování a ze samotné reakce by potom klesly ze 75,6 g na pouhých **16,9 g** na MJ vodíku. Prvním problémem však je, že pro zachycení téměř dvojnásobného množství CO₂ je nutné i dvojnásobné množství energie. Pro provoz zachytávajících technologií v tomto režimu se spotřebuje **6 g metanu** a tím pádem unikne kolem **18 g CO_{2eq}** a zároveň při tomto procesu unikne **16 g CO₂**. To znamená že při sečtení veškerých emisí vzniklých výrobou modrého vodíku se zachycením CO₂ jak z parní reformace, tak ze spalování zemního plynu pro provoz reakce unikne **135 g CO_{2eq}**.

Dále se studie zabývá teoretickým scénářem, kdy jsou parní reformace i zachytávací systémy poháněny energií z obnovitelných zdrojů a zemní plyn je využíván pouze pro reakce v procesu parní reformace. Uhlíková stopa je potom **52 g CO_{2eq}** na MJ vodíku. To je pokles o pouhých 53 % oproti 111 g CO_{2eq} vzniklých přímým spalováním zemního plynu. Elektřina vytvořená obnovitelnými zdroji by navíc mohla být efektivněji využita pro výrobu zeleného vodíku elektrolýzou vody, jehož by ho při použití stejného množství energie bylo vyrobeno více než takovouto ekologickou parní reformací.

Pokud jde čistě o metanové emise, pak je ekologičtější možností šedý vodík, jelikož při jeho výrobě je spalováno menší množství zemního plynu. Existují i studie, které tvrdí, že je možné snížit emise šedého vodíku až o 90 %. Žádná z těchto studií ovšem není podložena konkrétními daty a pravděpodobně nepočítají s emisemi vzniklými provozem zachytávacích systémů.

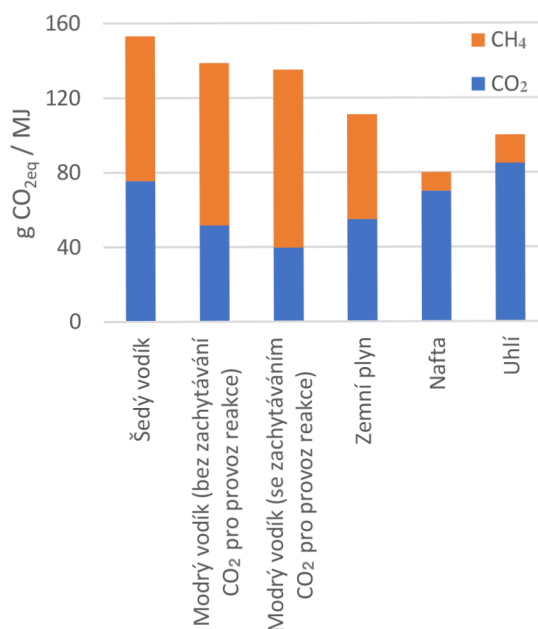
Obrázek 5 pak shrnuje porovnání různých paliv z hlediska množství a druhu vypuštěných emisí při spalování těchto paliv pro získání 1 MJ energie.

Dále je nutné zmínit že na komerční úrovni není v provozu žádná aplikace, která by byla schopná skutečně dlouhodobě skladovat zachycené CO₂. Ve skutečnosti je toto CO₂ nejčastěji použito pro enhanced oil recovery kde je opět vypuštěno zpět do atmosféry.

Tab. 1 Srovnání emisí šedého a modrého vodíku

[9]

| | Šedý H ₂ | Modrý H ₂ (bez zachytávání CO ₂ ze spalování zemního plynu) | Modrý H ₂ (se zachytáváním CO ₂ ze spalování zemního plynu) |
|--|---------------------|---|---|
| Parní reformace | | | |
| Spotřebované CH ₄ (g CH ₄ /MJ) | 14,0 | 14,0 | 14,0 |
| Vyprodukované CO ₂ (g CO ₂ /MJ) | 38,5 | 38,5 | 38,5 |
| Uniklé emise CH ₄ (g CH ₄ /MJ) | 0,49 | 0,49 | 0,49 |
| Uniklé emise CH ₄ (g CO _{2eq} /MJ) | 42,1 | 42,1 | 42,1 |
| Přímé CO ₂ emise (g CO ₂ /MJ) | 38,5 | 5,8 | 5,8 |
| Poměr zachycení CO ₂ | 0 % | 85 % | 85 % |
| Energie na pohon parní reformace | | | |
| Spotřebované CH ₄ (g CH ₄ /MJ) | 11,6 | 11,6 | 11,6 |
| Vyprodukované CO ₂ (g CO ₂ /MJ) | 31,8 | 31,8 | 31,8 |
| Uniklé emise CH ₄ (g CH ₄ /MJ) | 0,41 | 0,41 | 0,41 |
| Uniklé emise CH ₄ (g CO _{2eq} /MJ) | 35,3 | 35,3 | 35,3 |
| Přímé CO ₂ emise (g CO ₂ /MJ) | 31,8 | 31,8 | 11,1 |
| Poměr zachycení CO ₂ | 0 % | 0 % | 65 % |
| Energie na zachycení CO₂ | | | |
| Spotřebované CH ₄ (g CH ₄ /MJ) | 0,0 | 3,0 | 6,0 |
| Vyprodukované CO ₂ (g CO ₂ /MJ) | 0,0 | 8,2 | 16,3 |
| Uniklé emise CH ₄ (g CH ₄ /MJ) | 0,0 | 0,11 | 0,21 |
| Uniklé emise CH ₄ (g CO _{2eq} /MJ) | 0,0 | 9,5 | 18,0 |
| Přímé CO ₂ emise (g CO ₂ /MJ) | 0,0 | 8,2 | 16,0 |
| Emise CO ₂ při dopravě a těžbě (g CO ₂ /MJ) | 5,3 | 5,9 | 6,5 |
| Celkové množství spotřebovaného CH ₄ (g CH ₄ /MJ) | 25,6 | 28,6 | 31,6 |
| Celkové množství vyprodukovaného CO ₂ (g CO ₂ /MJ) | 75,6 | 51,7 | 39,7 |
| Celkový únik CH ₄ (g CO _{2eq} /MJ) | 77,4 | 86,9 | 95,4 |
| Celkové emise (g CO _{2eq} /MJ) | 153,0 | 139,0 | 135,0 |



Obr. 5 Porovnání uniklých skleníkových plynů při spalování různých paliv pro získání 1 MJ energie [9]

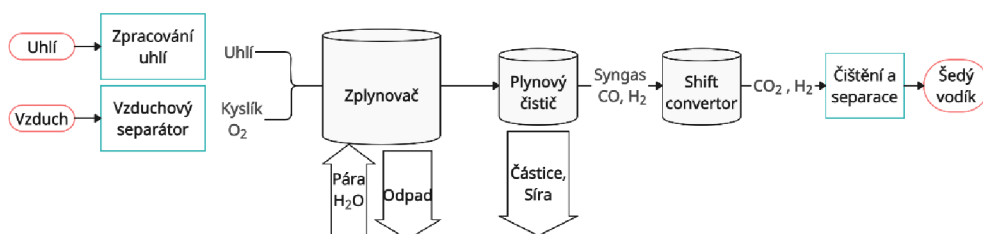
Po přihlednutí k výše zmíněným zjištěním je potom jasné, že z ekologického hlediska ani při předpokladu nejlepších možných podmínek nelze modrý vodík ani náhodou považovat za „téměř zelenou“ alternativu šedého vodíku a ekologicky potom vychází výhodněji spalovat samotný zemní plyn. Podle autorů této studie je modrý vodík propagován hlavně těžařskými společnostmi, které tímto způsobem prodají více zemního plynu, ze kterého bude ve výsledku získáno méně energie, a to vše pod záminkou ekologie. Modrý vodík se tak zdá být pouze další slepou uličkou v cestě za obnovitelným zdrojem vodíku.

1.4 ČERNÝ/HNĚDÝ VODÍK

Černý a **hnědý** vodík jsou získávány z parní reformace uhlí. Proces získávání vodíku za použití uhlí je možné rozdělit do dvou fází. Nejdříve je do zplynovače vpuštěn kyslík, který reaguje s částí uhlí a utvoří tak oxid uhličitý. Ve druhé fázi je proud kyslíku přerušen a do komory je vpuštěna pára. Pára potom reaguje se zahřátým uhlím a vytváří kombinaci oxidu uhličitého a vodíku. [5]



Tato metoda je z ekologického pohledu nejvíce znečišťující nejen z hlediska poměru množství uvolněných skleníkových plynů na množství vyrobeného vodíku, ale i z hlediska spotřeby vody. Uhelné zplynování spotřebovává až 38 litrů vody na 1 kilogram vodíku. Ovšem v zemích jako je Čína je vzhledem k relativně vysoké ceně zemního plynu a velkým zásobám uhlí tato metoda často využívána. [5]



Obr. 6 Schéma procesu parní reformace uhlí

[5]

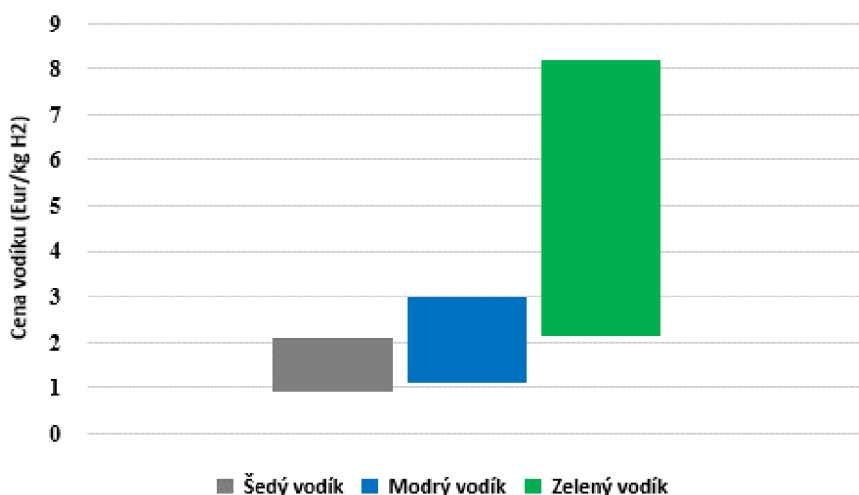
1.5 ZELENÝ VODÍK

Principem výroby **zeleného** vodíku je elektrolýza vody, tedy rozdělení molekuly H₂O na samostatný vodík a kyslík. Oba tyto produkty mohou být dále zachycovány a využívány. Za předpokladu, že energie vstupující do tohoto procesu pochází z obnovitelných zdrojů, pak můžeme mluvit o zeleném vodíku, při jehož výrobě do atmosféry neuniká žádný skleníkový plyn. Za obnovitelné zdroje jsou potom nejčastěji považovány solární, fotovoltaické, větrné a vodní elektrárny. [5]

Jednou z hlavních výhod zeleného vodíku je jeho chemická čistota. Při výrobě vodíku elektrolýzou vody je čistota výsledného produktu často více než 99,99 % [5], z tohoto důvodu je tento vodík vhodný pro použití v palivových článcích nebo například v laboratořích i bez nutnosti dodatečného zvyšování čistoty vodíku. Další výhodou zeleného vodíku je, že jeho výroba je možná nejen ve velkých, ale i v malých měřítkách, například i na úrovni samostatného koncového uživatele. [5]

Celosvětově ovšem v roce 2021 bylo elektrolýzou vytvořeno pouze 0,03 % [5] produkce vodíku. Důvodem je energetická náročnost procesu promítající se tak ve vysoké ceně. Dalším faktorem zvyšujícím cenu zeleného vodíku je malé množství jeho produkce. Jedním z důvodů, proč je šedý vodík tak levný, je fakt že je vyráběn v masivních množstvích pomocí již prověřených metod, zatímco zelený vodík je spíše lokální záležitostí. Předpokládá se proto, že při postupném nárůstu produkce zeleného vodíku bude jeho cena výrazně klesat. Cenové porovnání šedého, modrého a zeleného vodíku je vyobrazené v obrázku 8. [5]

Jedním z problémů při produkci zeleného vodíku je nutnost čisté vody. Často je totiž pro výrobu vodíku využívána sluneční energie. Problémem je, že v oblastech s nejvyšší sluneční aktivitou je častý nedostatek čisté vody, a různé metody elektrolýzy spotřebují 10 až 15 litrů vody na 1 kilogram vodíku [5]. Jedním z řešení tohoto problému je potom další vývoj a následné zlevnění a zefektivnění odsolovacích technologií mořské vody, což by mimo jiné mohlo zároveň i pomoci s nedostatkem pitné vody, se kterým se potýká velká část populace v těchto částech světa [5].



Obr. 7 Porovnání ceny vodíku produkovaného různými metodami [5]

1.6 BÍLÝ VODÍK

Asi šestina světové produkce samostatného vodíku vzniká jako vedlejší produkt převážně při petrochemických procesech [4]. Při těchto procesech jsou základem fosilní paliva, takže se takovýto vodík nedá označit za uhlíkově neutrální, ovšem dalo by se říci, že se jedná o jakousi recyklaci odpadu chemických reakcí. Někdy je jako bílý vodík označován vodík získaný přímou těžbou, pro takovýto vodík ovšem v současné době neexistuje efektivní způsob jeho zachytávání [5].

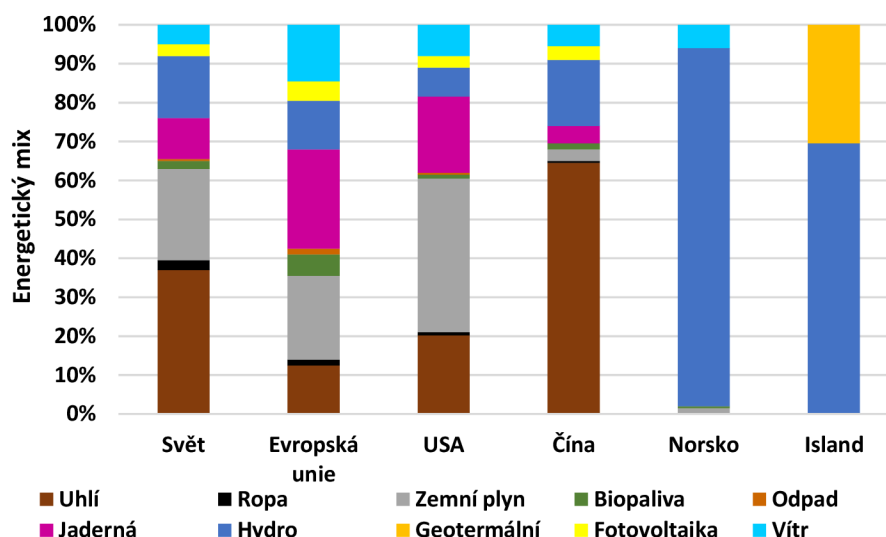
1.7 BIO-VODÍK

Bio-vodík je získáván z biomasy dvěma hlavními cestami. Tou první je biologická cesta, kdy jsou použity mikroorganismy žijící v určité formě biomasy a buď za přítomnosti světla, a tedy určitou formou fotosyntézy, nebo naopak bez přítomnosti světla, produkují vodík a spotřebovávají biomasu. Druhou cestou je chemická cesta, kde je z biomasy vytvářen na vodík bohatý plyn, který je dále pomocí chemických procesů přeměněn na čistý vodík. [11]

Výhodou bio-vodíku je, že je získáván z přírodních a odpadních materiálů vzniklých například v zemědělství nebo dřevozpracujícím průmyslu. Není tedy nutné, aby se v tomto procesu vyskytovala jakákoliv forma fosilních paliv, a i přes to, že při produkci bio-vodíku může vznikat CO₂, tak se jedná například o uhlík zachycený rostlinami z atmosféry, a tím pádem jde o CO₂ neutrální metodu získávání vodíku. V současnosti touto metodou není produkováno velké množství vodíku, této metodě je ovšem věnována čím dál větší pozornost a předpokládá se, že v budoucnu bude hrát bio-vodík výrazně větší roli obnovitelného zdroje vodíku. [11]

1.8 DALŠÍ DRUHY

Jako **žlutý** vodík může být označován i vodík vyráběný pomocí solární energie, ovšem častěji coby žlutý vodík označujeme vodík vyráběný elektrolýzou, jejímž zdrojem je elektrická síť. Například v zemích jako je Norsko či Island, kde většina této energie pochází z vodních a geotermálních elektráren, by bylo možné mluvit o takto vyrobeném vodíku jako o zeleném. To ovšem neplatí pro mnoho zemí. Většina energetických sítí stále spoléhá na elektrárny spalující fosilní paliva a takto vyrobený vodík tím pádem stále zanechává uhlíkovou stopu. [5]



Obr. 8 Porovnání energetického mixu různých zemí v roce 2020

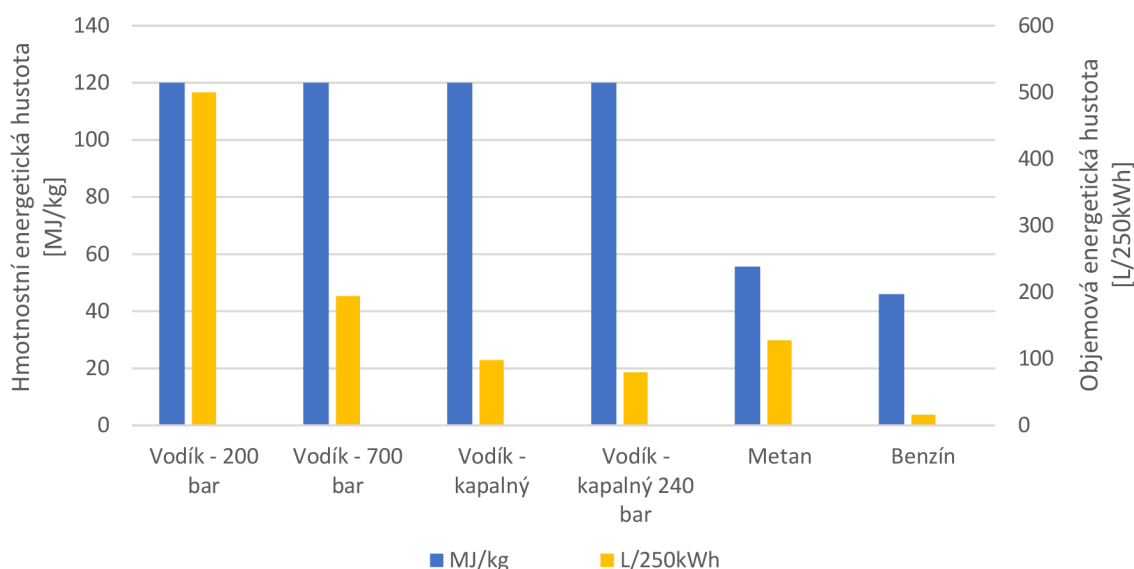
[5]

Fialový (nebo někdy též **ružový** nebo **červený** vodík) je vodík vyráběný elektrolýzou poháňenou energií čistě z jaderných elektráren. Podle mnohých by právě takovýto jaderný vodík mohl představovat možný překlenovací způsob výroby vodíku před plným nástupem zeleného vodíku. V zemích jako je Čína či Japonsko je tato metoda rozvíjena nejvíce. V evropských zemích a ve Spojených Státech Amerických je zatím tento přístup opomíjen na úkor výše zmíněného modrého vodíku. Dalším možným využitím by mohlo být uskladnění přebytečné energie vyrobené jadernou elektrárnou. Šlo by o to, že by se poblíž jaderné elektrárny nacházel velký elektrolyzátor, který by z přebytečné energie vyráběl vodík, jenž by byl za použití palivových článků přetvářen zpět na elektrickou energii v době nedostatku energie. [5]

Tyrkysový vodík se po ekologické stránce nachází mezi modrým a zeleným vodíkem. Jedná se o novou metodu metanové pyrolýzy, jež je principiálně stejná jako u modrého vodíku; ovšem uhlík, který je touto metodou produkován, není ve formě oxidu uhličitého, ale v čisté pevné formě. Bylo by tak možné jej bez větších potíží téměř všechen zachytit a snadno uskladnit či dále použít. [5]

2 PROBLEMATIKA SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Největší výhodou vodíku je jeho energetická hustota. V porovnání se všemi nenukleárními palivy má vodík v jednom kilogramu uloženo násobně větší množství energie. Konkrétně se jedná o 120–142 MJ/kg, což je přibližně třikrát více než zemní plyn. Největší nevýhodou vodíku je ovšem jeho velice nízká energetická objemová hustota- za normálních podmínek se v 1 m³ vodíku nachází 10,8 MJ, což je přibližně třikrát méně než u zemního plynu. [12]



Obr. 9 Porovnání hmotnostních energetických hustot a objemů paliv s obsahem energie 250 kWh [12; 13]

Tab. 2 Parametry různých paliv při stejném množství energie (250 kWh) [12; 13]

| | Benzín | Zemní plyn | Stlačený vodík | | Tekutý vodík | |
|----------|---------|------------|----------------|--------|--------------|--------|
| Tlak | 0,1 MPa | 20 MPa | 20 MPa | 70 MPa | 0,1 MPa | 24 MPa |
| Hmotnost | 20 kg | 18 kg | 7 kg | 7 kg | 7 kg | 7 kg |
| Objem | 16 l | 128 l | 500 l | 194 l | 98 l | 80 l |

Na základě těchto hodnot je tedy jasné, že není reálné skladovat vodík v jeho čisté podobě při atmosférických podmínkách. Pro efektivní skladování energie ve vodíku existuje mnoho přístupů. Nejjednodušším a nejrozšířenějším je jeho stlačení, a tím dosažení zvýšení hustoty plynu. Další možností je zkapalnění způsobené snížením teploty na -253 °C [1], tedy kolem 20,7 K a současně zvýšení tlaku. Tato metoda je ovšem vysoce energeticky náročná. Další možností, jak efektivně skladovat vodík, je jeho svázání s jinými materiály či výroba molekul obsahujících co nejvíce atomů vodíku. V praxi se dále užívá technologie metal hydridů, kde je vodík napuštěn do prostoru v krystalické mřížce vhodné kovové slitiny a při zvýšené teplotě je tento vodík opět uvolněn. Hlavní nevýhodou této metody je však vysoká hmotnost v poměru k množství uskladněného vodíku. Pokud jde o navázání vodíku do formy molekul pak je nejčastěji využíváno metanu (CH₄) a především čpavku (NH₄). V případě metanu je největší nevýhodou nežádoucí výskyt uhlíku a následný vznik skleníkových plynů. V případě čpavku je nevýhodou, kromě energetické náročnosti výroby a následného rozložení i jeho vysoká toxicita [14].

Tab. 3 Potřebná energie pro stlačení nebo zkapalnění vodíku

[12]

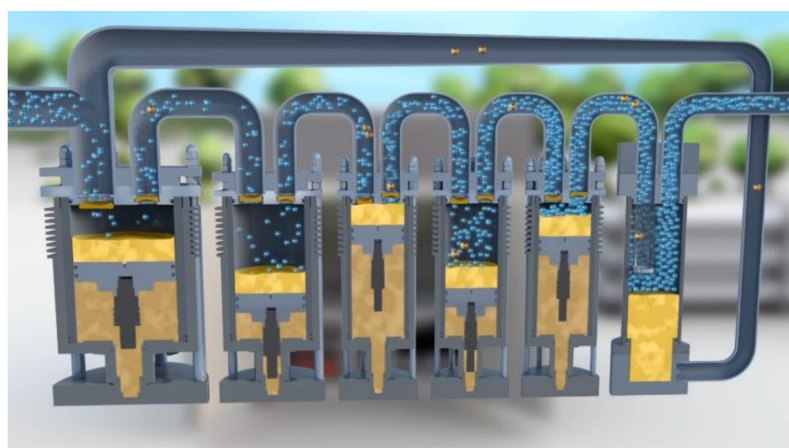
| Původní obsah energie | Energie potřebná ke stlačení | Energie potřebná ke zkapalnění / objem | Výsledný obsah energie |
|-----------------------|------------------------------|--|------------------------|
| 100% - 142 MJ/kg | | 80MJ/kg # 100 kg/den | 43,7 % - 62 MJ/kg |
| | | 50MJ/kg # 10 000 kg/den | 64,8 % - 92 MJ/kg |
| | 14 MJ/kg # 20 MPa | | 90,1 % - 128 MJ/kg |
| | 22 MJ/kg # 70 MPa | | 84,5 % - 120 MJ/kg |

2.1 STLAČENÍ

Stlačení vodíku je nejjednodušší cestou ke zvýšení jeho objemové energetické hustoty. Jedná se totiž o použití v praxi velice běžných technologií s vysokou mírou spolehlivosti. Hlavním znakem vodíkových kompresorů je absence maziva, které by mohlo znehodnotit stlačovaný plyn. Problémem však je, že i při tlaku 80 MPa vodík stále zabírá přibližně 3násobek objemu benzínu o stejné energetické hodnotě. Dále je pak pro stlačení na takový tlak spotřebován ekvivalent více než 10 % energie stlačovaného vodíku. [12]

Běžně se vyskytujícími technologiemi jsou, nejčastěji vícestupňové, pístové kompresory bez maziva. Dalším běžným typem kompresoru je membránový kompresor, kde stlačované médium přijde do kontaktu pouze se samotnou membránou, a je tak snadno zachována jeho čistota. [12; 15]

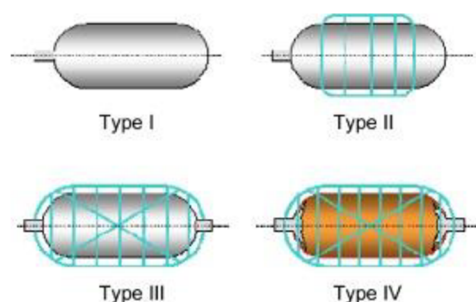
Iontový kompresor, který od roku 2002 vyvíjela firma Linde a který je od roku 2009 komerčně užíván pro vodíkové aplikace pracuje na podobném principu jako vícestupňový pístový kompresor. Rozdíl je však v tom, že na povrchu pístu, který přijde do přímého kontaktu s vodíkem je vrstva iontové kapaliny, která je téměř nestlačitelná a nijak nereaguje s vodíkem. Písty pak navíc nejsou zvedány mechanicky, ale hydraulicky. Část iontové tekutiny je poté stlačována spolu s vodíkem a na konci procesu je oddělena a vrácena zpět do oběhu. Tento design v porovnání s konvenčními pístovými kompresory výrazně snižuje opotřebení a energetické náklady snižuje až o 40 %. Další výhodou tohoto kompresoru jsou rozměry, kdy samotný kompresor dosahuje výšky přibližně jednoho metru. Tento kompresor je využíván například ve švýcarských plnicích vodíkových stanicích. [16; 17; 15]



Obr. 10 Grafické znázornění funkce iontového kompresoru

[16]

Tlakové vodíkové lahve se běžně dělí na 4 typy. **Typ 1** je celokovová nádoba, běžně ocelová – jedná se tedy o nejtěžší ze všech typů. Běžně bývají lahve typu 1 využívány pro stacionární aplikace. Při tlaku 20–30 MPa je přibližně jedno hmotnostní procento plné nádrže typu 1 tvořeno uskladněným vodíkem. **Typ 2** je kompozitní obalená nádoba s kovovou vložkou. Hlavní výhodou této nádoby je její snížená hmotnost oproti typu 1. Ovšem pro použití například v mobilních aplikacích mají tyto nádrže stále příliš nízký hmotnostní poměr nádrže ku uskladněnému vodíku. Typy 1 a 2 jsou navíc náchylné na projevy vodíkové koroze. Nádrž **typu 3** je kompletně zabalená kompozitní nádoba, jejíž základ tvoří hliníková vložka sloužící hlavně k zabránění úniku vodíku. Tato vložka je pak obalena nejčastěji uhlíkovými vlákny, které slouží jako hlavní nositel napětí. V porovnání s typy 1 a 2 poskytuje tato nádrž 25–75% nárůst poměrové hmotnosti vodíku v nádrži. Typ 3 je spolehlivý do tlaku 45 MPa. **Typ 4** je stejně jako typ 3 kompletně zabalená kompozitní nádoba. Rozdíl je však v tom, že je vložka tvořena plastem (nejčastěji polyethylenem o vysoké hustotě). Tato plastová vložka je pak obalena buď uhlíkovými, nebo skelnými vlákny v epoxidové matrici. Nádrže typu 4 odolávají tlaku až 100 MPa a mají, díky své nízké hmotnosti, nejlepší hmotnostní poměr uskladněného vodíku. Jedná se tak o nejvhodnější tlakovou nádobu pro použití v mobilních aplikacích. Problémem nádob typu 3 a 4 je cena uhlíkového vlákna. U typu 4 tvoří uhlíkové vlákno až 75 % veškerých nákladů na výrobu takovéto nádrže. [13; 18]

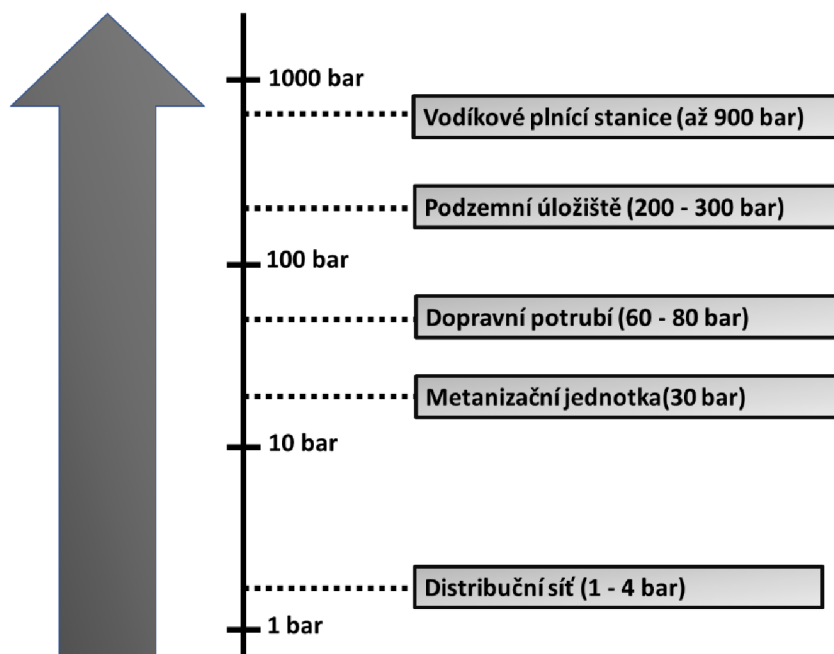


Obr. 11 Grafické znázornění typů vodíkových tlakových lahví

[13]

Tlakové lahve na vodík jsou navíc opatřené přetlakovým ventilem. V případě, že jsou nádrže téměř plné, ale například vlivem vysoké okolní teploty vzroste tlak nad bezpečnou úroveň, tak je část vodíku v lahvích upuštěna [19]. Jedná se o nežádoucí efekt, kterému se zabráňuje různými způsoby. Pokud jsou nádoby uskladněné venku, mohou být natřené speciální barvou odrážející značnou část slunečního záření [19]. Alternativou je uskladnění lahví v prostoru se stabilní a pokud možno nízkou teplotou. Potom však vyvstává problém s uskladněním vodíku v uzavřeném prostoru (viz kapitola 3.1.3).

Vodík v plynném skupenství lze využít pro obohacení směsi zemního plynu pro dosažení vyšší výhřevnosti [18]. Dále může být spalování čistého vodíku využito jako čisté alternativy k zemnímu plynu [18]. Bylo by ho takto možné využívat coby zdroj tepla v domácnostech a především v ocelárnách a jiných kov zpracujících průmyslech. Kov zpracující průmysl každoročně vyprodukuje více než 7 % světových emisí CO₂ [20]. Švédská společnost H2 Green Steel zvládá produkovat ocel se snížením emisí o 95 % a do roku 2030 chtějí dosáhnout produkce 5 milionů tun oceli ročně [21; 22]. Další možností využití plynného vodíku je využití stlačeného vodíku pro pohon nákladních či osobních automobilů, které pomocí palivových článků přeměňují vodík v elektřinu, kterou pak pohánějí elektromotory [18]. Alternativou je možnost přímého spalování vodíku ve spalovacích motorech automobilů. Tato metoda s sebou však přináší mnohá úskalí. Jedním z nich je například fakt, že spalováním vodíku ve spalovacím motoru vnikají kromě vody i emise NO_x které je dále nutné redukovat [18].



Obr. 12 Využití vodíku při různých tlacích

[12]

2.2 ZKAPALNĚNÍ

Další možností, jak skladovat vodík v jeho čisté formě, je jeho zkapalnění při atmosférickém nebo zvýšeném tlaku. Vodík je nejčastěji zkapalňován za pomoci tekutého hélia [18]. Oproti pouhému stlačení vodíku je tato varianta, díky zvýšené hustotě kapalného vodíku, kompaktnější (viz Tab. 2) a jelikož není vodík uchovávan pod extrémně vysokým tlakem, tak je tato metoda i bezpečnější z hlediska možné exploze nádrže [18]. Hlavní její nevýhodou je však výrazně vyšší energetická náročnost, a tedy i ztráty celého systému (viz. Tab. 3) [12]. Bod varu vodíku je $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž kritická teplota je $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Vzhledem k extrémně nízkým teplotám, při kterých je nutné tekutý vodík uchovávat, je nezbytná tepelná izolace nádrží. Zpravidla bývají takovéto nádoby vakuově izolované, jedná se tedy o nádrže tvořené dvěma vrstvami, mezi nimiž je vakuum [18]. Ovšem i při použití takovýchto nádob je nevyhnutelný tzv. boil-off, tedy unikání způsobené relativně vysokou teplotou okolí [18]. Může se jednat o ztrátu v rozmezí od 0,06 % do 0,5 % obsahu vodíku za den podle velikosti nádrže - čím větší nádrž, tím nižší procentuální množství je takto ztraceno [18]. Boil-off efekt může představovat značné bezpečnostní riziko v případě, že by se takováto nádrž vyskytovala v uzavřeném prostoru [19]. Vzhledem k výše zmíněným nevýhodám je tekutý vodík využíván hlavně v aplikacích, kde je nutná vysoká energetická hustota, vodík takto nebude uskladňován příliš dlouho, a kde cena nehraje nezbytně velkou roli [13]. Konkrétně se jedná o vesmírné aplikace a přepravu středních až velkých množství vodíku. Kromě návěsu, který pojme až 4 tuny tekutého vodíku existují i lodě s kapacitou 90 tun. Společností Kawasaki Heavy Industries Ltd. je dále vyvíjena loď schopná pojmout až 11 500 tun tekutého vodíku [13]. Při skladování kapalného vodíku pod zvýšeným tlakem (běžně kolem 24 MPa) nedochází tak často k boil-off efektu, jelikož se zde pracuje s nádržemi dimenzovanými na vyšší tlak [13]. Nádrže bývají z pravidla konstruovány jako tlakové nádrže typu 3 obklopené vnější vrstvou od které je oddělena vakuum [13]. Takto skladovaný vodík má sice zvýšenou energetickou hustotu, ale při dodatečném stlačení vznikají další ztráty [13].

2.3 METAL HYDRIDY

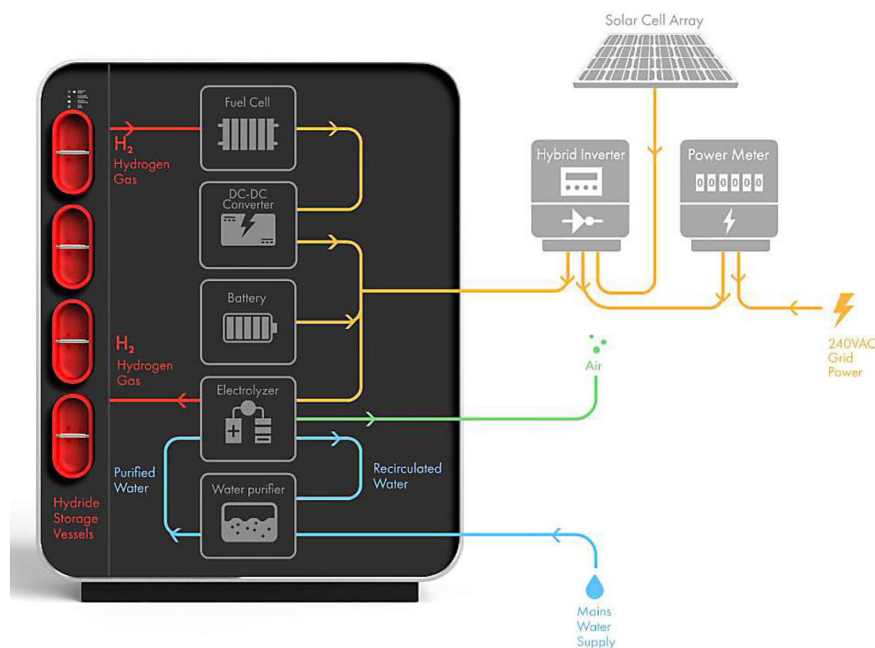
Efekt vodíkové koroze, který je podrobněji popsán v kapitole 2.5, je v podstatě využíván v procesu uskladnění vodíku v podobě metal hydridů. Jde o to, že slitina vhodných materiálů je za určité teploty a tlaku vystavena velkému množství atomárního vodíku, který vstoupí do krystalické mřížky, kde je potom za normálních podmínek stabilně uložen [12]. Při vystavení materiálu zvýšené teplotě dochází k uvolnění uloženého vodíku [12]. Tato metoda je v porovnání s vysokotlakým či kryogenním uložením vodíku výrazně bezpečnější, jelikož nehrozí samovolný únik koncentrovaného plynného vodíku, a navíc zde nepracujeme s vysokými tlaky ani s extrémně nízkými teplotami [12]. Tento proces je tudíž i energeticky méně náročný, jelikož plynný vodík nemusíme nijak upravovat a nevznikají tak pouze malé dodatečné ztráty. Nevýhodou je však křehkost materiálu s vysokým obsahem vodíku; je nutné, aby takovýto materiál nebyl vystaven velkým otřesům, aby nedošlo k rozpadu celé struktury materiálu a vodík tak samovolně neunikl [1]. Další nevýhodou je pak vysoká hmotnost. Nejlepší slitiny pojmu až kolem 10 % [15] své hmotnosti ve vodíku, to znamená, že takovýto materiál, ve kterém je 1 kg vodíku bude vážit 11 kg. Tento poměr je ovšem spíše výjimkou a častěji bývají v oblasti kolem 2 % hmotnosti nosného materiálu [15]. Z těchto vlastností je jasné, že vodík uložený v podobě metal hydridů není vhodný pro mobilní aplikace, ale spíše pro stacionární aplikace, jako je například dlouhodobá akumulace energie [18].

Tab. 4 Parametry jednotlivých metal hydridových slitin

[12]

| Metal hydrid | Procentuální hmotnostní množství vodíku | Teplota uvolnění vodíku při atmosférickém tlaku [°C] |
|-----------------------------------|---|--|
| La Ni ₅ H ₆ | 1,4 | 25 |
| Ti V ₂ H ₄ | 2,6 | 40 |
| Zr Mn ₂ H ₃ | 1,8 | 167 |
| Na Al H ₄ | 5,0 | 220 |
| Mg H ₂ | 7,6 | >300 |

V praxi můžeme pozorovat projekt LAVO, který se snaží konkurovat bateriovým úložištím elektrické energie za použití právě metal hydrátů. Jedná se o samostatnou jednotku, jejímiž vstupy jsou pouze voda a elektřina, nejčastěji ze solárních panelů. I přesto, že je možné uložit energii ve vodíku dlouhodobě bez časově závislých ztrát, tak LAVO systém není určen jako sezónní akumulátor energie a jedná se tedy opravdu o přímou konkurenci bateriových akumulátorů. Princip funkce je takový, že přebytečná elektrická energie je dodávána do elektrolyzéru, který elektrolyzou vody vytváří vodík. Tento vodík je dále dopraven do metal hydridových úložišť v podobě disků slitiny, které jsou následně zahřáty a vodík je z nich vypuštěn do palivového článku přetvářejícího vodík zpět na elektřinu. LAVO systém je doplněn o klasickou Li-ion baterii pro vyrovnání náhlých výkyvů ve spotřebě, které by samotný palivový článek nestihl vykrýt. [23]



Obr. 13 Grafické znázornění funkce LAVO jednotky

[24]

2.4 TVORBA NOVÝCH MOLEKUL

Jedním z problémů uchovávání čistého vodíku je jeho reaktivnost. Při kontaktu se vzduchem se velice ochotně váže na kyslík a vytváří tak molekuly vody. Tento problém je možné vyřešit cíleným navázáním volného vodíku na jiné atomy a vytvořit tak stabilní molekulu, se kterou se dále výrazně jednodušeji pracuje. Možnými molekulami jsou například metanol CH_3OH , metan CH_4 nebo amoniak NH_3 , známý též pod názvem čpavek. [15]

Z ekologického hlediska je nejatraktivnější možností právě amoniak pro svoji absenci uhlíku [15]. Další výhodou amoniaku je již zaběhnutá industriální výroba a existující infrastruktura [15], jedná se navíc o druhou nejprodukovanejší chemikálii na světě [25]. Amoniak je vhodný i pro svoji vysokou hustotu a vysoký bod varu, je tedy možné bez větších potíží uchovávat vodík v podobě tekutého amoniaku při teplotě $-33,3\text{ °C}$ a při tlaku $0,8\text{ MPa}$, přičemž takto se ve stejném objemu nachází větší množství vodíku, než kdyby měl být čistý vodík pouze zkapalněn [26]. Jelikož je molekula amoniaku výrazně větší a stabilnější, tak nedochází k efektu vodíkové koroze a je tak možné použít pro jeho uskladnění a přepravu běžné materiály. Pokud by měl být amoniak využit jako pouhý nosič vodíku, bylo by nutné v bodě výroby zřídit výrobní stanici amoniaku, ten pak poslat například potrubím ke spotřebiteli, kde by byl z amoniaku opět získáván čistý vodík. Při použití této metody je však problém v její cenové náročnosti a nízké efektivitě. Jako efektivnější metoda se jeví využití amoniakových palivových článků. Tyto články by přímo v místě spotřeby spotřebovávaly amoniak a vytvářely elektřinu obdobně, jako je tomu u vodíkových palivových článků [25].

Dnes nejběžnějším způsobem výroby amoniaku je Haber-Bosch proces, kdy za vysokého tlaku dochází k porušení silné dusíkové vazby a atomární dusík se potom sváže s atomy vodíku získanými nejčastěji parní reformací [26]. Tento proces je však energeticky velice náročný. Další možností, jak získávat amoniak je pomocí metody podobné elektrolýze vody. K anodě je přiváděna voda, která je za přítomnosti elektrického proudu rozdělena na kyslík, odcházející na straně anody a ionizovaný vodík, který cestuje přes membránu ke katodě [27]. Ke katodě

je však přiváděn dusík, který se spojí s vodíkem a vzniká tak amoniak s možným použitím čistě zeleného vodíku [27]. Problém s touto metodou je však její nízká účinnost v porovnání s Haber Bosch procesem [27]. Praktičtěji potom vypadá využití samotného amoniaku jako paliva namísto pouhého nosiče vodíku. Ve vývoji jsou technologie, které by umožňovaly spalování amoniaku v turbínách nebo například v autobusech a vozidlech nákladní dopravy [26]. Amoniak však není běžně využívaným palivem zejména z důvodu jeho vysoké toxicity [26].

Tab. 5 Srovnání parametrů možných nosičů vodíku se samotným vodíkem [1; 26; 28]

| | Hustota [kg/m ³] | Bod varu [°C] | Teplota samo- vznícení [°C] | Minimální energie pro zážeh [mJ] |
|---------|---------------------------------|------------------|--------------------------------|--|
| Vodík | 0,0899 | -252,9 | 571 | 0,02 |
| Amoniak | 0,86 | -33,5 | 651 | 8 |
| Metan | 0,676 | -161,6 | 600 | 0,28 |

2.5 BEZPEČNOSTNÍ POROVNÁNÍ SKLADOVACÍCH METOD

V této kapitole nebude pojednáváno o bezpečnosti samotného vodíku ale pouze o bezpečnostní stránce různých metod jeho uchovávání. Na bezpečnost vodíku je zaměřena kapitola 3.1.3.

Vysokotlaký plynný vodík

U aplikací, kde je vodík uchováván v plynném stavu pod vysokým tlakem, je jedním z rizik **vodíková koroze**. Jedná se o jev, při němž atomární vodík, který je nejmenším prvkem periodické tabulky, vniká do prostoru mezi atomy v krystalické mřížce. Síla spojující atomy v krystalické mřížce klesá s rostoucí mírou nasycení materiálu vodíkem a jsou tak postupně zhoršovány mechanické vlastnosti materiálu. Závažnost tohoto efektu roste se zvyšujícím se tlakem v nádobě - vyšší tlak totiž urychluje míru vnikání vodíku do mřížky materiálu a zároveň je samotný materiál namáhán větším napětím. Může tak v krajních případech dojít k narušení materiálu nádrže nebo potrubí obsahujících vodík. Řešením tohoto problému může být uchovávání vodíku při nižších tlacích nebo použití nádob ze speciálních materiálů odolných vůči vodíkové korozi. [29]

Dalším rizikem je samotný **vysoký tlak**. Všechny tlakové nádoby musí podléhat certifikaci, přičemž do 5 MPa nepředstavuje tlak příliš vysoké riziko. Ovšem při použití lahví, které mohou uchovávat vodík při tlaku až 70 MPa, se tlak stává hlavním bezpečnostním rizikem. Z toho důvodu je nutné, aby se v blízkém okolí tlakových lahví pohyboval pouze kvalifikovaný personál. Kolem tlakových lahví je pak vymezena explozivní zóna ohraničená plotem, za který smí vstoupit pouze kvalifikovaná obsluha. Velikost této zóny se odvíjí od maximálního tlaku v lahvích, druhu a množství uchovávaného plynu. Tato oblast je vypočítána hasiči. Lahve by potom měly být uloženy, případně ukotveny, takovým způsobem, aby bylo co nejvíce sníženo riziko jejich poškození vlivem působení vnějších sil, jimiž mohou být například zemětřesení nebo jiné ničivé jevy, které je možné očekávat v oblastech, kde jsou tlakové nádrže uchovávány. [19]

Kapalný vodík

V porovnání s plynným vysokotlakým vodíkem zde vodíková koroze není tak závažným problémem ze dvou důvodů. Kapalný vodík o extrémně nízké teplotě nevstupuje do krystalické mřížky tak snadno jako plynný vodík, dále je pak kapalný vodík zpravidla uchováván při nižších tlacích. Při porušení izolace a náhlém ohřátí tekutého vodíku se i z relativně malého množství tekutiny stává velké množství plynu. Tento efekt vede k rapidnímu nárůstu tlaku a může vést až k explozi a rozptýlení velkého množství plynného vodíku do okolí. Kvůli nevyhnutelnému blow-off efektu je dále nutné skladovat kryogenní nádrže v dobře odvětrávaném prostoru a je nezbytné zaručit neustálou funkčnost blow-off ventilu, aby nedošlo k přílišnému nárůstu tlaku v nádobě. [19]

Metal hydráty

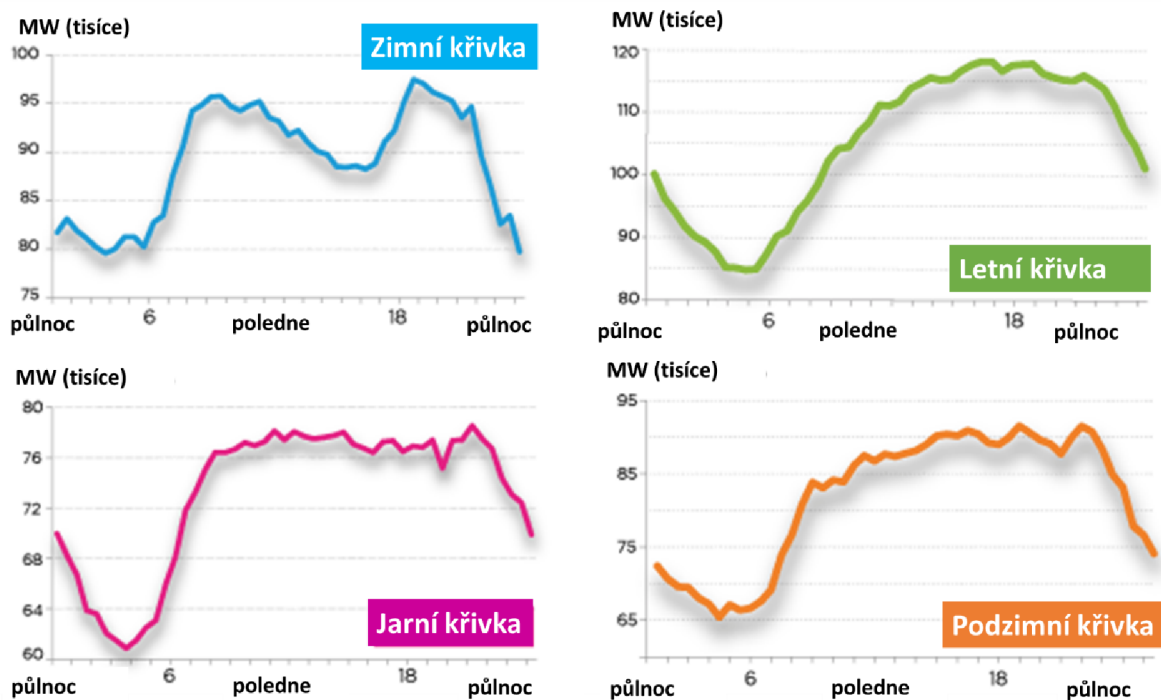
Jelikož metal hydráty využívají efekt vodíkové koroze ve svůj prospěch, tak se nejedná o problematický jev. Vodík v podobě metal hydrátů je uložen ve stabilní formě za normálního tlaku a teploty a při mechanickém poškození nemůže dojít k rozptýlení většího množství vodíku. Z bezpečnostního hlediska je metal hydrátové úložiště tou nejlepší možností, jak uchovávat vodík. [19]

Čpavek

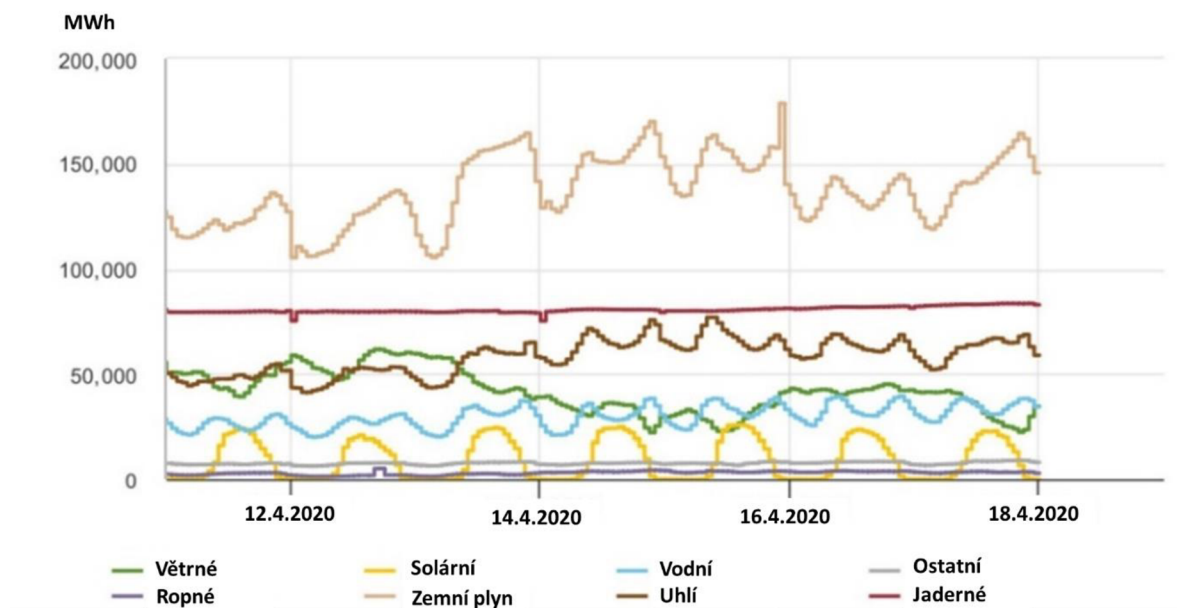
Amoniak je hořlavý plyn uchovávaný pod tlakem, který je toxický při vdechnutí, způsobuje poleptání kůže a poškození očí [14]. Je vysoce toxický pro vodní organismy, a to i s dlouhodobými následky [14]. Je tedy jasné, že při uchovávání vodíku v podobě amoniaku vyvstává celá řada závažných bezpečnostních rizik. Amoniak je nutné skladovat na dobře větraném místě [14], při jeho hoření mohou vznikat toxické nebo korozivní výpary v podobě oxidu dusnatého a oxidu dusičitého [14].

3 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE VE VODÍKU VE SROVNÁNÍ S BATERIOVÝM ÚLOŽIŠTĚM

V energetické síti bez akumulátorů je nutná naprostá rovnováha mezi spotřebou a výrobou elektřiny. Spotřeba kolísá zaprvé denně, a to tak, že ráno a večer bývá zpravidla vysoká, zatímco během dne a přes noc bývá menší. Zadruhé pak spotřeba kolísá sezónně, a to tak, že v zimě je velká spotřeba na ohřátí budov a v létě je ještě větší spotřeba na jejich ochlazení. Hlavním zdrojem výkyvů ve výrobě je čím dál větší výskyt obnovitelných zdrojů s kolísajícím množstvím vyráběné energie. Fotovoltaické panely vyrábějí elektřinu pouze přes den a navíc během zimních měsíců je jejich účinnost výrazně snížena. Podobně to platí i pro větrné elektrárny. Tyto výkyvy je možné vyrovnávat snižováním a zvyšováním výkonnosti elektráren - nejčastěji je pro tyto účely využíváno přečerpávacích vodních elektráren nebo elektráren spalujících zemní plyn, a to kvůli jejich rychlé reakční době u daných výkyvů. Je možné i odpojování a připojování celých bloků elektráren, tato metoda je však velice zdlouhavá a je jí proto využíváno při zvýšení výroby s příchodem zimy, kdy je nutné na dlouhou dobu výrazně zvýšit výrobu. Ovšem s neustále rostoucím podílem obnovitelných zdrojů v energetickém mixu a s očekávaným ústupem od spalování fosilních paliv je nutné zvážit možnost většího využití akumulátorů energie. [30; 31]



Obr. 14 Spotřeba elektřiny v průběhu dne během jednotlivých ročních období [32]



Obr. 15 Výroba elektřiny v USA rozdělená podle zdroje v dubnu 2020 [33]

3.1 DRUHY AKUMULÁTORŮ

3.1.1 VODÍK

Princip ukládání energie ve vodíku spočívá v tom, že přebytečná energie v systému je využita k elektrolýze vody a následné výrobě a uložení vodíku. V případě nedostatku energie v síti je vodík přepouštěn do palivového článku, kde je z něj vyráběna elektřina.

Vodíkový palivový článek funguje na principu obrácené elektrolýzy. K anodě je přiváděn vodík, zatímco ke katodě je přiváděn kyslík, nebo (častěji), obyčejný vzduch. Anoda a katoda jsou odděleny elektrolytem, který na straně anody rozděluje vodík na pozitivní a negativní ion, tedy elektron a proton. Elektron potom putuje ke katodě externím okruhem, čímž vytváří elektrický proud, zatímco proton putuje ke katodě skrz elektrolyt. U katody se pak elektrony a protony spojí s kyslíkem, a utváří tak molekuly vody. [34]

Hlavní nevýhodou tohoto akumulačního systému jsou velké ztráty. Na výrobu 1 kg vodíku elektrolýzou je potřeba přibližně mezi 45 a 55 kWh energie [35], zatímco z jednoho 1kg vodíku získáme maximálně přibližně 33 kWh [36] energie. Další nevýhodou vodíkových systémů je pomalá reakce palivového článku na náhlé výkyvy požadovaných dodávek energie [37]. Pokud by byl vodík využíván stejným způsobem, jakým jsou využívány baterie, docházelo by k prodávám v řádu až desítek sekund [37] mezi požadavkem na dodávku energie a skutečným dodáním této energie. Z toho důvodu jsou vodíkové systémy běžně hybridní [19] - pracují totiž spolu s relativně malou baterií, která vyrovnává nežádoucí zpoždění. Výhodou je však to, že při zvětšování kapacity uložené energie stačí pouze zvýšení kapacity úložiště, zatímco zbytek systému může zůstat beze změny.

Způsoby ukládání vodíku, které dávají smysl v akumulačních aplikacích, jsou stlačení vodíku a metal hydráty z důvodu relativně nízké dodatečné energetické investice. Pro uskladnění velkého množství vodíku je možné využít kavit zanechaných po vytěžení zemním plynem [12]. Takto velké množství vodíku by bylo možné využít i jako sezonní úložiště energie. V případě,

že by obnovitelné zdroje tvořily podstatnou část energetického mixu, bylo by možné je využívat k tomu, aby během slunečných a větrných měsíců vyráběly vodík, který by byl ukládán pod zemí a v zimě by byl využíván pro vyplnění nedostatku energie. Při provozu palivového článku je produkováno i velké množství tepla - bylo by tudíž možné využívat takovouto stanicí nejen jako zdroj elektrické energie, ale i zdroj tepla.

Metal hydráty začínají být využívány například i na úrovni samostatných rodinných domů jako přímá konkurence baterií. Společnost LAVO pracuje na samostatném systému, do kterého se pouze připojí vstup a výstup elektřiny a vstup vody [24]. Vodík je pak ukládán na metal hydridové svitky za normální teploty a tlaku [23]. Systém je sice v porovnání s bateriemi dražší ale má výrazně vyšší cyklovou životnost a vyšší možné vybíjecí proudy [23]. LAVO se tak snaží vytvořit přímou konkurenci bateriím pro ostrovně zařízené aplikace.

3.1.2 BATERIE

Bateriová úložiště jsou v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie často používanou možností akumulace energie. Baterie je možné využít jak v malých aplikacích s kapacitou pohybující se řádově v kWh, tak i k regulaci celých elektráren s kapacitou v řádech MWh [12]. V porovnání s vodíkem zde dochází pouze k relativně malým ztrátám, dochází zde však k takzvanému samovybíjení, kdy je část energie neustále ztrácena [34]. Při použití baterií jako sezónního úložiště vyvstávají 2 hlavní problémy. Prvním jsou již zmíněné dlouhodobé ztráty. I ty nejlepší baterie totiž ztrácí mezi 2–10 % uložené energie každý měsíc, přičemž při snížených teplotách toto procento roste [34]. Pokud bychom tedy chtěli v létě baterie nabít a v zimě z nich čerpat energii, pak by začaly být ztráty takového systému značné. Druhým problémem je cena. Pro sezónní úložiště energie je nezbytná vysoká kapacita. Jediným způsobem, jak navýšit kapacitu bateriového úložiště, je prosté přikoupení baterií [12], cena tedy roste úměrně s kapacitou. Životnost baterií je omezena počtem cyklů, s jejichž nárůstem klesá kapacita a rostou ztráty [34]. Ve srovnání s vodíkem tedy bateriová úložiště zaostávají vysokou cenou na kWh uložené energie a neschopností uchování energie v delším časovém horizontu [26].

Z ekologického hlediska pak baterie zaostávají za zeleným vodíkem. Zatímco pro výrobu akumulátoru na stlačený vodík zpravidla není nutné užití vzácných nebo závadných materiálů, u baterií tomu tak nemusí být. Nejčastějšími materiály pro výrobu baterií jsou lithium, kobalt a nikl [34].

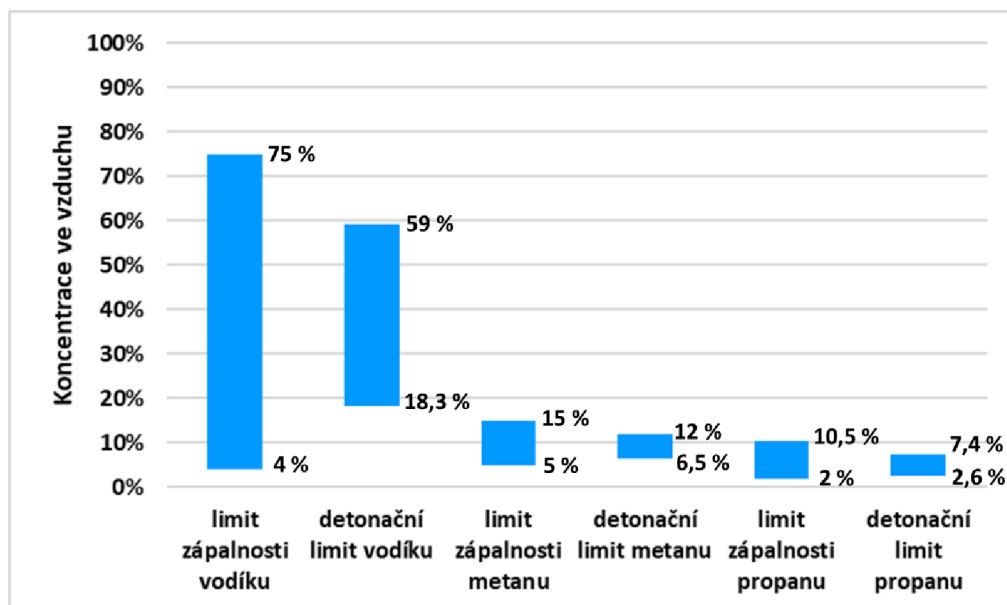
Při těžbě lithia dochází ke kontaminaci vody a půdy, čímž je ohrožen okolní ekosystém. Hlavním vývozcem lithia je Čína, která jako primární zdroj energie při těžbě využívá zejména uhlí [38]. Při těžbě lithia tedy uniká velké množství CO₂ těžbou 1 tuny lithia je takto vypuštěno až 15 tun CO₂ [38].

Těžba kobaltu má značné negativní dopady na zdraví lidí vyskytujících se v oblastech se zvýšenou koncentrací kobaltového prachu a čistého kobaltu [39]. Kobalt může poškodit oči, kůži, plíce, srdce a při dlouhodobém vystavení může i způsobovat rakovinu [39]. S těžbou kobaltu je navíc často spojena řada humanitárních problémů. Z daleka největším vývozcem kobaltu je Demokratická republika Kongo [40], v jejichž dolech lidé často pracují v extrémních, životu nebezpečných podmínkách za minimální plat [41]. Podle Amnesty International pracuje v dolech v DRK až 40 000 dětí, z nichž některé mají pouhých 6 let [41]. Tyto faktory mají výrazný vliv i na zvýšený počet smrtelných nehod v kobaltových dolech [42]. Výhodou kobaltu je však jeho dobrá recyklovatelnost [43].

Kobalt bývá nejčastěji získáván jako vedlejší produkt těžby niklu nebo mědi [44]. Při těžbě niklu tedy dochází ke stejným negativním humanitárním dopadům, jako jsou zmíněné v předchozím odstavci.

3.1.3 BEZPEČNOSTNÍ POROVNÁNÍ BATERÍ A VODÍKU

Největší bezpečnostní rizika **vodíku** jsou spojená s jeho únikem. Jak je vidět na obrázku 16, vodík má velké koncentrační rozmezí zápalnosti v porovnání s jinými plyny [26]. Z tohoto důvodu je jeho únik v uzavřeném prostoru velkým rizikem, a proto je snahou skladovat vodík ve venkovních prostorech. Pokud by k takovému úniku mělo dojít ve venkovním prostoru, tak je riziko zápalnosti či detonace z bezpečnostního hlediska výrazně sníženo. Jelikož je vodík lehčí než vzduch, tak tento uniklý vodík začne okamžitě stoupat a mísit se se vzduchem, kde se rozptýlí a zároveň se naváže na kyslík a utvoří tak molekuly vody. V takovém případě je pravděpodobnost překročení kritické koncentrace vodíku v blízkosti osob či vybavení poměrně nízká. Další rizika spojená s různými způsoby skladování vodíku jsou uvedena v kapitole 2.5. [19]



Obr. 16 Koncentrační rozsah vhodný pro zapálení či detonaci různých paliv [26]

Pokud je s **bateriemi** nakládáno tak jak udává výrobce, tak jsou relativně bezpečné. Problém však může nastat při jejich nadměrném zahřátí, k čemuž může dojít odběrem příliš velkých proudů; mechanickým poškozením baterie, které může způsobit zkrat, nebo zahřátím od vnějšího zdroje tepla. V takovém případě se baterie zahřejí na takovou úroveň, že dojde k řetězové reakci, která způsobí těžko uhasitelný požár. Pokud k takovému požáru dojde ve venkovních prostorech, pak je nejjednodušším postupem nechat baterie vyhořet a zabránit rozšíření požáru do okolí. V případě že k takovému požáru dojde ve vnitřních prostorech, je jeho hašení pochopitelně výrazně větší problém. Baterie bývají opatřeny řadou bezpečnostních prvků, které výrazně snižují riziko vzniku požáru. Stále se však jedná o zařízení s obrovským množstvím naakumulované energie v malém prostoru, a proto je nezbytné, aby za žádných okolností nedošlo k náhlému neřízenému uvolnění této energie. [19]

3.1.4 DALŠÍ DRUHY AKUMULÁTORŮ

Kromě baterií a vodíku existuje mnoho dalších možností, jak akumulovat elektrickou energii. Všechny však mají kromě výhod pochopitelně i mnohé nevýhody.

Například **setrvačnick** je technicky v porovnání s ostatními technologiemi velice jednoduchý, a tudíž i velmi levný. Jedná se o roztočení velké hmoty za použití přebytečné energie, která se setrvačností udržuje v pohybu. Při nedostatku energie je pak setrvačnick připojen na alternátor či dynamo a přeměňuje tak svou mechanickou energii zpět v elektrickou. Dlouhodobé ukládání velkého množství energie je však za použití setrvačnicku nemyslitelné, protože setrvačnick je vhodný spíše pro krátkodobé uložení energie. [12]

Další známou, již hojněji využívanou metodou ukládání energie, je využití **přečerpávacích vodních elektráren**. Tato metoda spočívá v tom, že je voda přepouštěna z horní nádrže do spodní, při čemž roztáčí turbínu a vytváří energii v případě jejího nedostatku. Když je naopak energie v síti přebytek, je voda za pomoci čerpadel přečerpávána zpět do horní nádrže. Výhodou této metody jsou obrovské energetické toky, které je tato elektrárna schopna vytvořit či pojmout. Další skvělou vlastností jsou vysoké účinnosti celého procesu. Tato metoda je ideální pro vyrovnávání výkyvů rozsáhlých elektrických sítí, není však vhodná k něčemu, jako je sezónní akumulace energie. Ačkoliv je možné držet tento akumulátor v tzv. nabitém stavu teoreticky neomezeně dlouho, je ho možné vybijet pouze po dobu několika hodin až dní. Další určitou nevýhodou je nemožnost lokalizovaného použití. [12]

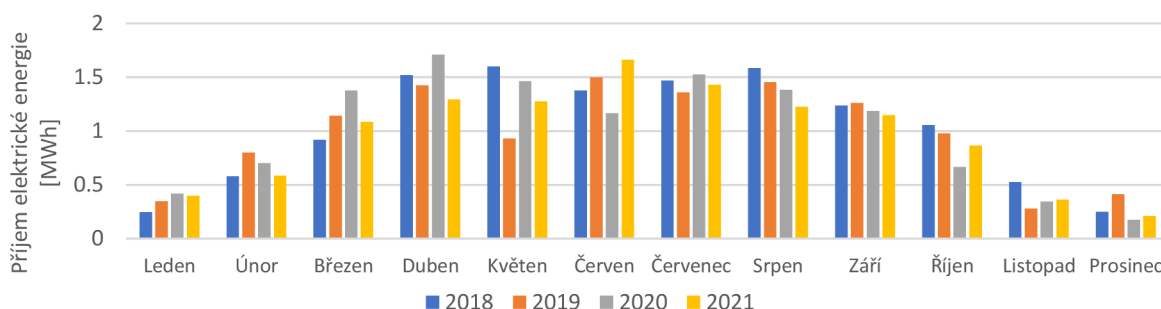
Jednou z vyvíjených metod je využívání **stlačeného vzduchu**. V době přebytku energie je vzduch pomocí kompresorů stlačen a následně je přes turbínu v případě potřeby vypouštěn. V porovnávání s vodíkem, který je také nutné uchovávat za vysokého tlaku, zde není pod tlakem vysoce hořlavá problematická látka, ale pouhý snadno uskladnitelný vzduch. Dále je v porovnání s vodíkem levnější, jelikož zde není nutné použití specializovaných technologií. Obecnou nevýhodou je však nízká celková účinnost kolem 60–70 %. Kromě vzduchu je možné stlačovat i jiné plyny, pracuje se například s CO₂, kde však za přítomnosti vlhkosti dochází ke vzniku kyseliny uhličité, která může způsobovat korozi částí systému a je tak nutné využít korozi odolné materiály. Dalším faktorem je fakt, že CO₂ je na rozdíl od vzduchu skleníkovým plynem. [12]

Další možností, jak ukládat energii, jsou takzvané **termální akumulátory**. Jedná se o ohřev média, které je schopno dlouhodobě udržovat teplo a následně toto teplo přímo využívat k vytápění. Často se zde využívá levných a všudypřítomných materiálů, jako jsou cihly, drce né kameny nebo písek. Výhodou těchto systémů je, že jsou nabíjeny hlavně v létě, když jsou obnovitelné zdroje nejefektivnější a potřeba tepelné energie je na minimu. Tuto energii jsou potom schopny udržet až do zimního období, kdy je potřebné teplo dodáváno do tepelné infrastruktury. V roce 2022 vytvořila finská společnost Polar Night Energy silo na 100 tun písku, který potom, za použití obnovitelných zdrojů energie, ohřála na 600 °C. Takto ohřátý písek je potom možné v tepelně izolovaném silu skladovat až po dobu měsíců. V tomto 100 tunovém silu bylo uloženo až 8 MWh energie. Tato technologie je velice levná a kapacitu uložené energie je snadné navýšit pouhým zvětšením sila a přidáním písku. Udávaná životnost pískového akumulátoru je navíc 50 let. I přes to, že je teoreticky možné získávat z takového akumulátoru elektrickou energii pouhým ohřátím vody pro vznik páry, kterou je následně roztáčena turbína, je tento proces zásadně neefektivní. Pokud by z pískové baterie bylo odebíráno teplo tak se její účinnost pohybuje okolo 99 %. Pokud by však výše zmíněným procesem byla vyráběna elektřina, klesla by účinnost asi na 25 %. [12]

4 REÁLNÁ APLIKACE

4.1 VSTUPNÍ DATA

Reálná aplikace byla vypracována na základě dat energie vyrobené fotovoltaickými panely na střeše budovy C3 za poslední 4 roky. Pomocí těchto dat byl vytvořen průměrný rok, se kterým bylo dále počítáno. Pro simulaci spotřeby bylo zvoleno různé množství elektromobilů, kdy do každého z nich bude každý den dobyto 7,5 kWh, což odpovídá přibližně 50 km dojezdu.



Obr. 17 Příjem elektrické energie ze solárních panelů na budově C3

[45]

4.2 PŘEDPOKLADY

Jelikož jsou solární panely 16 let staré [45], předpokládá se u nich zhruba poloviční výkonnost oproti jejich původnímu stavu [45]. Dále je tedy počítáno s různým stupněm modernizace panelů. Současné panely měly v době instalace výkon 106 pW [45], přičemž moderní panely mají výkon kolem 410 pW [45]. Pro zjednodušení je tedy při použití nových panelů počítáno s dvojnásobným výkonem při použití moderních panelů s 8-násobkem současného výkonu.

Tab. 6 Přehled vlivu modernizace fotovoltaických panelů na výrobu energie

| Stav fotovoltaických panelů | Násobky současných hodnot |
|-----------------------------|---------------------------|
| Současné | 1 |
| Nové | 2 |
| Moderní | 8 |

4.3 POUŽITÉ KOMPONENTY

Detaily tohoto modulárního úložiště včetně cenových odhadů jednotlivých komponent vycházejí převážně z konzultace s Matějem Jakubcem ze společnosti Devinn. Společnost Devinn je česká společnost zabývající se návrhem a instalací vodíkových akumulacích systémů jak pro soukromé domy, tak i pro větší komplexy nebo využitím palivových článků jako alternativy k ostrovním generátorům elektrické energie. [19].

Elektrolyzér

Byl zvolen alkalický elektrolyzér typu AEM elektrolyser 4.0 od společnosti Enapter. Jejich množství je úměrné míře vstupní energie [19]. Společnost Enapter má mnoho úspěšných apli-

kací po celém světě a dodává alkalické elektrolyzéry s dobrými parametry za relativně nízkou cenu [19]. Výhodou alkalických elektrolyzérů je, že pracují s vysokou účinností v rozmezí od 72 do 82 % [18] za teplot v rozmezí od 100 do 150 °C [34]. Jedná se navíc o již dlouho užívanou metodu získávání vodíku z vody, která je dnes běžně používaná i ve velkých měřítkách [18]. Pro zvýšení efektivity musí být do vody přidán hydroxid draselný (KOH) nebo chlorid sodný (NaCl) [46].

Tab. 7 Parametry použitého elektrolyzéro společnosti Enapter

[47]

| | |
|--|--|
| Míra produkce | až 500 NL/h nebo až 1,0785 kg/24 h |
| Produkce vodíku | 57,6 kWh/kg |
| Čistota vytvořeného vodíku | 99,9 % |
| Výstupní tlak | až 3,5 MPa |
| Nominální spotřeba energie na Nm ³ vyprodukovaného vodíku | 4,8 kWh/Nm ³ , na začátku životnosti |
| Operační spotřeba energie | 2,4kW, začátek životnosti |
| Maximální spotřeba energie | 3 kW |
| Maximální produkce tepla | 800 W |
| Účinnost | $\frac{100 \times 0,8 \text{ kW}}{3 \text{ kW}} = 26,6 \%$ |
| Zdroj energie | 200–230 V(AC), 50/60 Hz |

Kompresor

Pro daný systém by bylo možné zvolit kterýkoliv z kompresorů zmíněných v kapitole 2.1, konkrétní kompresor však zvolen nebyl. Na základě konzultace byla pouze zvolena energetická ztráta 12 % energie stlačeného vodíku a cenový odhad v oblasti 1,8 milionu korun. [19]

H2 Base

H2 base je produktem společnosti Devinn a sestává ze tří samostatně dostupných modulů. Modul M1 je zásobníkový, jeden tento modul pojme až 14,1 kg vodíku při tlaku až 50 MPa [48]. Jelikož je však u zde navrhovaného systému počítáno s vlastním modulárním úložištěm vodíku, tak není použití modulu M1 nutné.

Modul M2 obsahuje palivový článek typu PEM (Proton Exchange Membrane), který je schopný dodávat nominální výkon 25 kW [48]. Pro vyšší výkony je možné spojit až 4 tyto moduly pro dosažení až 100 kW nominálního výkonu [48]. Výhodou tohoto modulu je možnost využití, jinak ztrátového, tepla - na modul M2 je totiž možné připojit vodní okruh, který tak může být ohříván až na teplotu 65 °C [48]. Získáme tak dodatečný tepelný výkon až 25 kW při použití 1 modulu M2 [48]. Pokud bychom využili jak elektrickou, tak tepelnou

energii, bylo by možné uvažovat efektivitu přesahující 90 % [19]. Výhodou palivového článku typu PEM je, že pracuje při relativně nízkých teplotách v rozmezí od 60 do 80 °C [34] s účinnostmi v rozmezí od 40 do 50 % [34]. Jedná se tak o jeden z nejefektivnějších typů palivového článku při zachování pracovní teploty do 100 °C [34]. Jako elektrolyt je v PEM článku použita vrstva platiny [34], čímž je značně zvýšena cena PEM článků.

Modul M3 je výstupní [48] a jeho součástí je pomocná baterie o kapacitě 8,5 kWh a maximálním výkonu až 100 kW [48]. Tato baterie pomáhá palivovému článku při jeho zapnutí a dále pomáhá s vykrytím napěťových špiček [48]. Baterie může v případě nutnosti i napájet elektrolyzér, pokud je aktuální spotřeba energie nízká a baterie je plně nabitá [19]. Další součástí modulu M3 jsou výstupní konektory [48], které lze navolit podle potřeby [49]. Je možné použít až 3 konektory CCS a CHADeMO, díky kterým lze modul M3 použít jako rychlonabíjecí stanici až pro 3 elektromobily [49]. Pro nabíjení více než 3 elektromobilů v jednu chvíli je nutné dokoupit další modul M3. Dále je možné nainstalovat jak 3-fázové, tak 1-fázové zásuvky [48]. Další možností je pak i DC výstup o napětí 0–1000 V [48]. Modul 3 dále obsahuje veškerou řídicí elektroniku, díky které je možné sledovat množství vodíku v nádržích, regulovat maximální výkon a případně ovládat tok ohřívání vody [49].

Tab. 8 Parametry použitých modulů od společnosti Devinn [48]

| | |
|--|---|
| Elektrický výkon | 0 – 100 kW |
| Maximální tepelný výkon | 25 kW při teplotě vody 65 °C |
| Typ palivového článku | PEM |
| Spotřeba vodíku (při jednom M2 modulu) | 1,5 kg vodíku za hodinu |
| Možnosti výstupu | 3-fázový AC, 1-fázový AC, 3x rychlonabíječka pro elektromobily, 0 – 1 000 V DC, výstup teplé vody |

Tlakové nádrže

Tlakové nádrže byly zvoleny od společnosti Steel Head Composites. Jedná se lahve typu 3 s hliníkovou vložkou o maximálním provozním tlaku 35 MPa. Jedna lahev o délce 2,6 m a průměru 0,425 m pojme až 6,2 kg vodíku. Množství těchto lahví se odvíjí od požadovaného energetického výstupu. Životnost takovýchto nádrží se pohybuje okolo 10 let. [50]

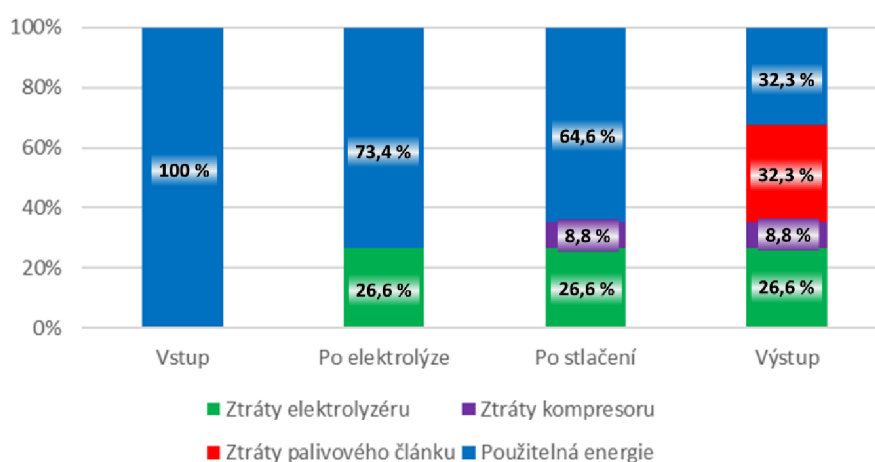
Celý systém

Celý akumulační systém funguje tak, že přebytečná část energie ze solárních panelů putuje rovnou ke spotřebiteli a její předem určená část putuje do elektrolyzérů. Elektrolyzéry přemění elektřinu na vodík, který je následně stlačen na tlak 35 MPa a uložen v tlakových lahvích. Každý den je potom spotřebováno stejné množství energie v závislosti na množství napájených elektromobilů. V případě potřeby je možné odebírat z nádrží přímo čistý vodík. Vodík dále proudí k modulům H2 base, kde je za pomoci palivových článků přetvářen v elektrickou energii a teplo, které proudí k odběrateli.

Pokud by byla neustále využívána tepelná energie produkovaná palivovým článkem, tak by hlavním zdrojem ztrát byly elektrolyzátor a kompresor, které mají dohromady ztráty kolem 35,4 %. Celková efektivita systému by se tedy mohla pohybovat v oblasti kolem 64,6 %, ovšem v případě nevyužití tepelné energie má palivový článek účinnost kolem 50 %. Celková efektivita tak klesne do oblasti pouhých 32,3 % .

Tab. 9 Ztráty jednotlivých komponent

| Komponenta | Ztráty |
|-----------------|--------|
| Elektrolyzátor | 26,6 % |
| Kompresor | 12 % |
| Palivový článek | 50 % |



Obr. 18 Přehled celkových ztrát systému

Tab. 10 Cenový odhad jednotlivých komponent systému [19]

| Položka | Cenový odhad [miliony Kč] |
|--------------------------|---------------------------|
| Elektrolyzátor | 0,25 |
| Kompresor | 2 |
| Tlaková nádrž | 0,3 |
| H2 Base moduly | 6 |
| Vodíkové okruhy | 0,6 |
| Bezpečnostní certifikace | 0,4 |

4.4 VÝPOČTY PARAMETRŮ SYSTÉMU

Cílem následujících výpočtů je zjistit nutné množství tlakových lahví a dalších komponent v závislosti na měnícím se počtu nabíjených elektromobilů. Dále tyto výpočty slouží k přibližnému cenovému odhadu a cenovému srovnání s bateriovým úložištěm. Tabulka 6 představuje přehled použitých veličin při dále zmíněných výpočtech.

Tab.11 Seznam veličin použitých pro přibližný výpočet parametrů akumulačního systému

| Název | Význam | Jednotka | Symbol |
|---|--|----------|---------------------|
| Počet nabíjených elektromobilů | Tato hodnota se pohybuje v rozmezí od 1 do 10 | - | X |
| Měsíční spotřeba energie | Energie, kterou budou daný měsíc dobytí elektromobily | J | E_{out} |
| Měsíční spotřeba energie se ztrátami | Energie, která daný měsíc odejde z akumulátoru v podobě elektřiny a tepla | J | $E_{out\lambda}$ |
| Měsíční výroba energie | Energie dodaná do systému z fotovoltaických panelů | J | E_{in} |
| Měsíční výroba energie se ztrátami | Energie, která je uložena v uskladněném vodíku | J | $E_{in\lambda}$ |
| Měsíční přírůstek/úbytek energie | Energie, která daný měsíc v akumulátoru přibude nebo z něj ubude | J | E_{Δ} |
| Energie potřebná pro výrobu 1 kg vodíku | Použitý elektrolyzátor potřebuje k výrobě 1 kg vodíku 57,6 kWh | J/kg | $E \rightarrow H_2$ |
| Energie získaná z 1 kg vodíku | Použitý palivový článek vyrobí z 1 kg vodíku 33 kWh | J/kg | $H_2 \rightarrow E$ |
| Hmotnost vyrobeného vodíku | Hmotnost vodíku, která bude daný měsíc vyrobena | kg | H_{2in} |
| Hmotnost spotřebovaného vodíku | Hmotnost vodíku, kterou je nutné daný měsíc spotřebovat | kg | H_{2out} |
| Množství vodíku v nádrži v měsíci 1 | Jedná se o jakýkoliv měsíc, po měsíci 1 následuje měsíc 2 | kg | H_{2M1} |
| Množství vodíku v nádrži v měsíci 2 | Jedná se o jakýkoliv měsíc, měsíci 2 předchází měsíc 1 | kg | H_{2M2} |
| Změna množství vodíku | Ekvivalent H_{2in} a H_{2out} přičemž hodnoty H_{2in} jsou kladné a hodnoty H_{2out} záporné | kg | $H_{2\Delta}$ |
| Maximum uloženého vodíku | Maximální množství vodíku, které bude nutné uložit | kg | H_{2MAX} |
| Kapacita jedné lahve | Maximum vodíku, který je možné uložit v jedné lahvi | kg | H_{2LAHEV} |
| Počet lahví | Nutný minimální počet lahví pro uskladnění vodíku | - | Y |
| Ztracená energie | Energie ztracená vlivem ztrát v elektrolyzátoru, kompresoru a palivovém článku (bez využití tepelné energie) | J | $E_{ZTRÁTY}$ |

4.4.1 VODÍKOVÝ AKUMULAČNÍ SYSTÉM

Pro výpočty vodíkového akumulačního systému bylo využito technických parametrů výše zmíněných komponent.

Spotřeba energie

Prvním krokem byl návrh měsíční spotřeby, jež se odvíjí od počtu nabíjených elektromobilů. Prvním předpokladem je, že průměrný elektromobil má spotřebu 15 kWh/100 km a druhým

předpokladem je, že každý den bude do každého z nabíjených elektromobilů dobyto 50 km dojezdu, tedy 7,5 kWh. Měsíční spotřeba je tedy vypočtena podle vzorce (10). Dále je však nutné započítat ztráty při přeměně vodíku v elektrickou energii, které se pohybují kolem 50 %. Měsíční spotřeba se ztrátami bude tedy přibližně dvojnásobná (11).

$$X \cdot 7,5 \text{ kWh} \cdot 30 = E_{out} \quad (10)$$

$$\frac{E_{out}}{1 - 0,5} = E_{out\lambda} \quad (11)$$

Výroba energie

Dalším krokem je zjištění měsíční výroby uskladněné energie. Nejdříve je nutné navrhnout průměrný rok založený na vstupních datech z fotovoltaických panelů. Tato průměrná měsíční výroba je dále násobena dvěma při použití nových panelů nebo osmi při použití moderních panelů. Při přeměně elektrické energie ve vodík však vznikají ztráty v elektrolyzáru a kompresoru, proto je nutné použít výpočet (12) pro získání měsíční výroby energie se ztrátami.

$$E_{in} \cdot (1 - 0,266) \cdot (1 - 0,12) = E_{in\lambda} \quad (12)$$

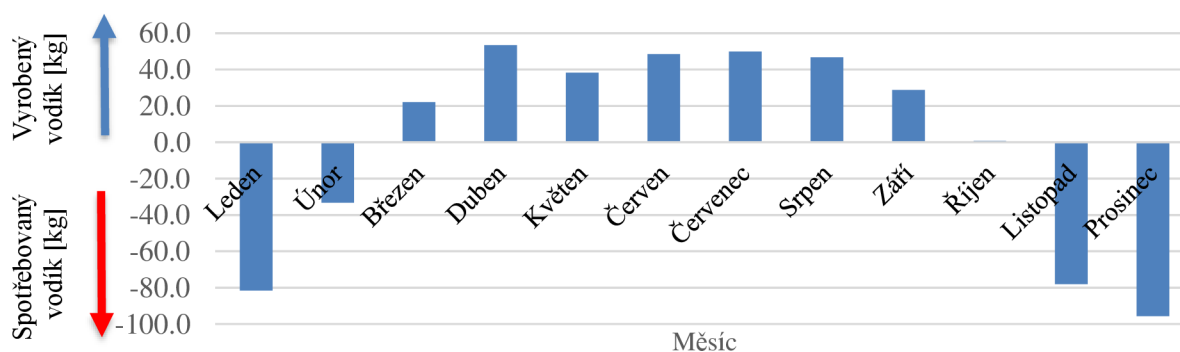
Výroba a spotřeba vodíku

Pro přepočítání měsíční výroby energie se ztrátami na měsíční výrobu vodíku je nutné nejprve určit, zda bude nutné daný měsíc více vodíku vyrobit, nebo spotřebovat. Pro zjištění této skutečnosti je nutné odečíst spotřebu energie od její výroby (13). Následně je využito parametrů použitého elektrolyzáru a palivového článku. V tomto případě zvládne elektrolyzáru vyrobit 1 kg vodíku z 57,6 kWh energie a palivový článek potom 1 kg vodíku přemění na 33 kWh energie. V případech, kdy je nutné daný měsíc více vodíku vyrobit, je tedy využito rovnice (14) a pokud je nutné více vodíku spotřebovat pak je využito rovnice (15).

$$E_{in\lambda} - E_{out\lambda} = E_{\Delta} \quad (13)$$

$$\frac{E_{\Delta}}{E \rightarrow H_2} = H_{2in} \quad (14)$$

$$\frac{E_{\Delta}}{H_2 \rightarrow E} = H_{2out} \quad (15)$$

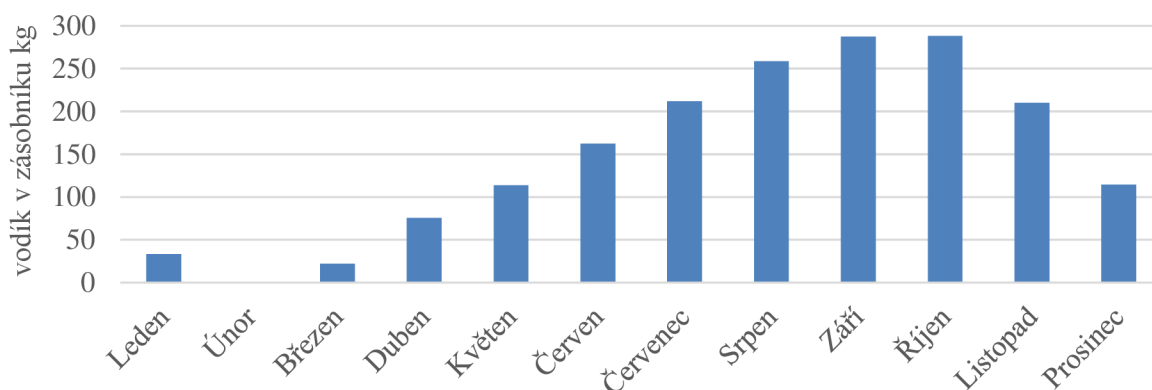


Obr. 19 Měsíční vodíkový transfer v systému 10 elektromobilů

Vodík v akumulátoru

Dále je nutné dosáhnout toho, aby v akumulátoru nedocházelo k postupnému nárůstu, nebo úbytku vodíku. Proto je zásadní zjistit, kolik kilogramů vodíku bude nutné daný měsíc uchovávat. Rovnice (16) představuje příklad takového výpočtu.

$$H2_{M1} + H2_{\Delta} = H2_{M2} \quad (16)$$



Obr. 20 Množství vodíku v tlakových nádržích pro systém 10 elektromobilů

Investované procento vyrobené energie

Pro dosažení toho, že nebude překročena horní ani dolní hranice množství vodíku, je nejjednodušší upravit hodnotu vyrobené energie. Takovouto úpravu je možné provést přesměrováním přebytečné energie rovnou ke spotřebiteli, čímž je získáno procento investované energie. Ukazatelem toho, zda došlo k vyrovnání výroby a spotřeby, je potom meziroční rozdíl množství vodíku v nádržích, který se musí co nejvíce přiblížit nule.

Počet použitých tlakových nádrží

Celkový počet tlakových nádrží pro daný systém získáme použitím rovnice (17).

$$\frac{H2_{MAX}}{H2_{LAHEV}} = Y \quad (17)$$

Roční energetická ztráta

Roční energetickou ztrátu získáme započítáním veškerých ztrát k investované energii (18, 19).

$$E_{in} * (1 - [1 - 0,266] * [1 - 0,12] * [1 - 0,5]) = E_{ZTRÁTY} \quad (18)$$

$$E_{in} * (1 - 0.323) = E_{ZTRÁTY} \quad (19)$$

Tab. 12 Srovnání parametrů vodíkového akumulátoru s měnícím se počtem nabíjených elektromobilů

| Počet aut | Stav panelů | Procentuální investice energie [%] | Ztracená energie za rok [MWh] | Maximální potřebné množství vodíku [kg] |
|-----------|-------------|------------------------------------|-------------------------------|---|
| 1 | Současné | 78,9 | 6,40 | 28,8 |
| 2 | Nové | 78,9 | 12,80 | 57,7 |
| 3 | Moderní | 29,6 | 19,20 | 86,5 |
| 4 | Moderní | 39,5 | 25,61 | 115,3 |
| 5 | Moderní | 49,4 | 32,01 | 144,7 |
| 6 | Moderní | 59,2 | 38,41 | 173,0 |
| 7 | Moderní | 69,1 | 44,81 | 201,9 |
| 8 | Moderní | 78,9 | 51,21 | 219,2 |
| 9 | Moderní | 88,8 | 57,61 | 259,5 |
| 10 | Moderní | 98,7 | 64,01 | 288,4 |

4.4.2 BATERIOVÁ ÚLOŽIŠTĚ

Pro srovnání především finanční stránky byl dále vytvořen ekvivalentní akumulční systém využívající bateriová úložiště. Byly zvoleny akumulátory Tesla Powerwall o kapacitě 13,5 kWh [51] a ceně přibližně 160 000 Kč [51] za akumulátor, účinnost nové baterie je 90 % [51]. Záruka na tento akumulátor je 10 let [51]. Tesla zaručuje, že účinnost po 10 letech neklesne pod 80 % [52] a kapacita neklesne pod 70 % [51].

Spotřeba

Spotřeba je vypočítána ekvivalentně jako u vodíkového úložiště, avšak zde je počítáno s nulovými ztrátami. Spotřeba se tedy rovná energii nabyté do elektromobilů.

Výroba

Výroba je počítána ekvivalentně jako u vodíkového úložiště, avšak zde jsou každý měsíc započítány 10% ztráty.

Počet akumulátorů

Množství potřebných akumulátorů bylo zjištěno obdobným způsobem jako počet tlakových lahví. Avšak vzhledem k předpokládanému poklesu kapacity na 70 % během 10 let byla předpokládaná kapacita baterií snížena na 70 % své původní hodnoty.

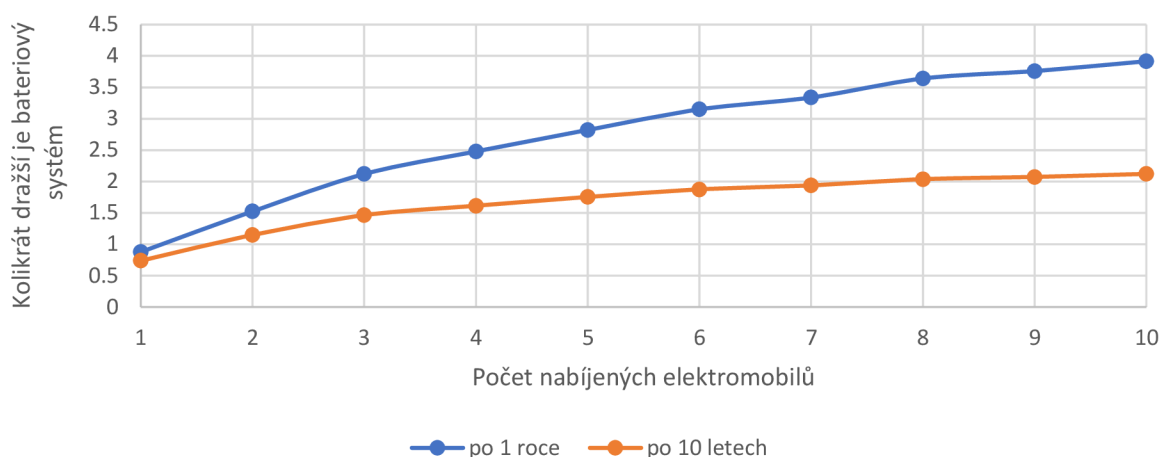
4.5 SROVNÁNÍ VODÍKOVÉHO A BATERIOVÉHO AKUMULÁTORU

Tabulka 13 představuje cenové srovnání obou systémů pro různý počet nabíjených elektromobilů. Na obrázku 21 je dále vyobrazeno, kolikrát je bateriový systém nákladnější než jeho vodíková alternativa, a to po jednom roce a po deseti letech užívání systému. Uvažuje se zde, že je ztracená energie přičtena k pořizovacím nákladům systému; je počítáno s cenou 3 500 Kč za MWh energie [53].

Tab. 13 Cenové srovnání vodíkového a bateriového akumulčního systému

| Vodík | | | | | Baterie | | |
|-----------|---------------------|-------------|--|------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|
| Počet aut | Počet elektrolyzérů | Počet lahví | Investovaná energie [MWh] ¹ | Pořizovací cena [miliony Kč] | Počet akumulátorů | Investovaná energie [MWh] | Pořizovací cena [miliony Kč] |
| 1 | 1 | 5 | 9,46 | 10,25 | 59 | 0,03 | 9,44 |
| 2 | 1 | 10 | 18,91 | 11,75 | 117 | 0,06 | 18,72 |
| 3 | 1 | 14 | 28,37 | 12,95 | 179 | 0,09 | 28,64 |
| 4 | 1 | 19 | 37,82 | 14,45 | 233 | 0,12 | 37,28 |
| 5 | 1 | 24 | 47,28 | 15,95 | 292 | 0,15 | 46,72 |
| 6 | 1 | 28 | 56,73 | 17,15 | 350 | 0,18 | 56,00 |
| 7 | 2 | 33 | 66,19 | 18,90 | 408 | 0,21 | 65,28 |
| 8 | 2 | 38 | 75,64 | 19,80 | 466 | 0,24 | 75,56 |
| 9 | 2 | 42 | 85,10 | 21,60 | 524 | 0,27 | 83,84 |
| 10 | 2 | 47 | 94,55 | 23,10 | 583 | 0,30 | 93,28 |

¹ Kolik energie odejde každý rok do akumulčního systému



Obr. 21 Poměr ceny vodíkového a bateriového systému

Z obrázku 21 vyplývá, že vodíkový akumulční systém bude levnější nejen z hlediska pořizovacích nákladů ale i v případě přičtení ztracené energie k těmto pořizovacím nákladům. V těchto výpočtech však není započítána cena modernizace fotovoltaických panelů, která není nutná při použití bateriového systému. Dále zde není vyobrazen vliv životnosti jednotlivých součástí systémů – záruka na Tesla Powerwall je na 10 let. Po 10 letech klesne kapacita baterií až na 70 %, tedy na minimální kapacitu, při které je ještě možné provozovat uváděný počet elektromobilů. Poté je možné buď vyměnit baterie za nové nebo dokoupit dodatečné baterie pro opětovné navýšení kapacity. V případě, že by nedošlo k obnově starých baterií však vystává problém se sníženou účinností z 90 na 80 %. Předpokládaná životnost tlakových lahví typu 3 ve vodíkovém akumulátoru se potom také odhaduje na 10 let [54]. V případě varianty pro nabíjení 10 elektromobilů představují tlakové lahve přibližně 60 % pořizovací ceny, tuto částku bude tedy nutné po uplynutí 10 let zaplatit znovu.

5 MODULÁRNÍ ÚLOŽIŠTĚ VODÍKU

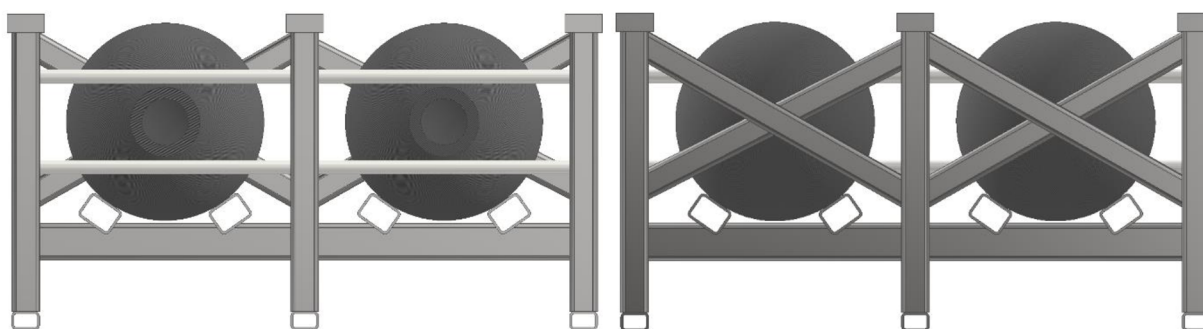
Navržené modulární úložiště vodíku se skládá celkem ze dvou druhů modulů. Jde o modul Úložný, ve kterém jsou uskladněny tlakové lahve a o modul Zastřešovací, který slouží jako ochrana před přírodními vlivy. V případě obou těchto modulů se jedná o svařovanou konstrukci převážně z uzavřených obdélníkových a U profilů.

5.1 ÚLOŽNÝ MODUL

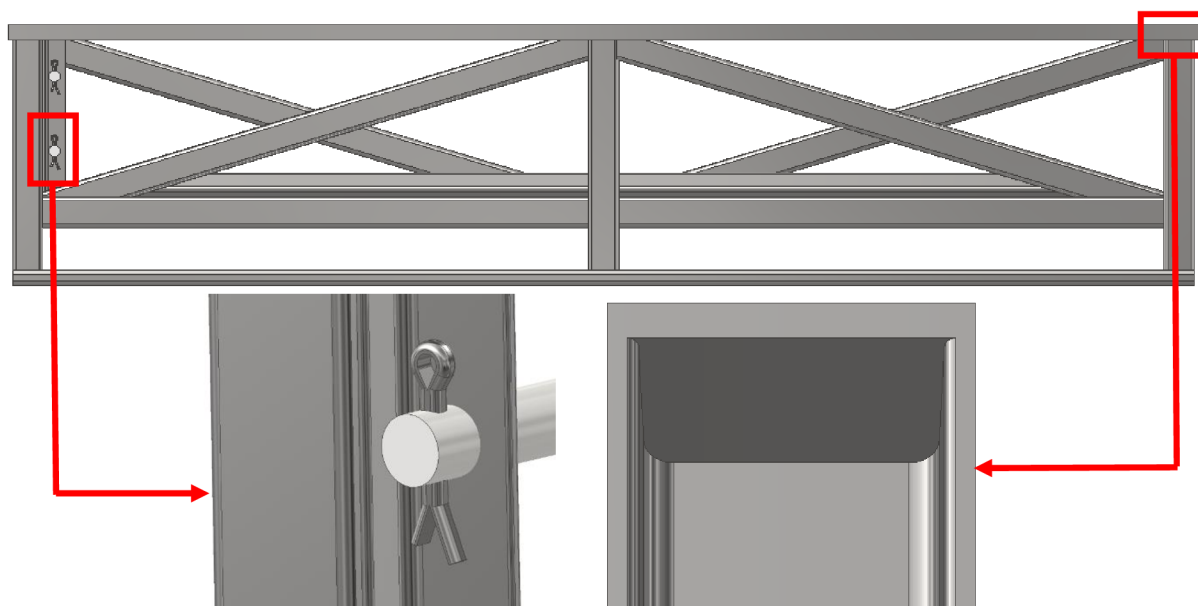
Pro konstrukci Úložného modulu byly zvoleny uzavřené obdélníkové profily o rozměru 80x60x5 dle normy ČSN 42 5720. Jedná se o svařované duté profily tvářené za studena. Celá konstrukce stojí na profilech 60x40x5 ze stejné normy. Dále je v horní části Úložného modulu využito U profilů typu UE8 dle normy ČSN 42 5571. Do těchto U profilů bude uložena další vrstva úložiště. Na obrázku 23 je vidět, že U profily jsou na koncích zaslepené vrstvou plechu o tloušťce 10 mm pro lepší zajištění polohy vyšších vrstev úložiště. Tlakové lahve budou uloženy na obdélníkových profilech přivařených pod úhlem, jejichž povrch bude potažen gumou pro snížení možnosti poškození povrchu lahve a zlepšení stability uložených lahví. Pro zajištění bezpečnosti v případě poškození lahve bude za lahvemi přivařen kříž z nosníků 80x60x5 a před lahvemi budou v přivařeném T profilu uloženy ocelové tyče o průměru 3 cm zajištěné závlačkou. Použitý T profil bude za tepla tvářený o rozměrech 60 A dle normy ČSN 42 5580.

Tab. 14 Použité druhy profilů a jejich množství

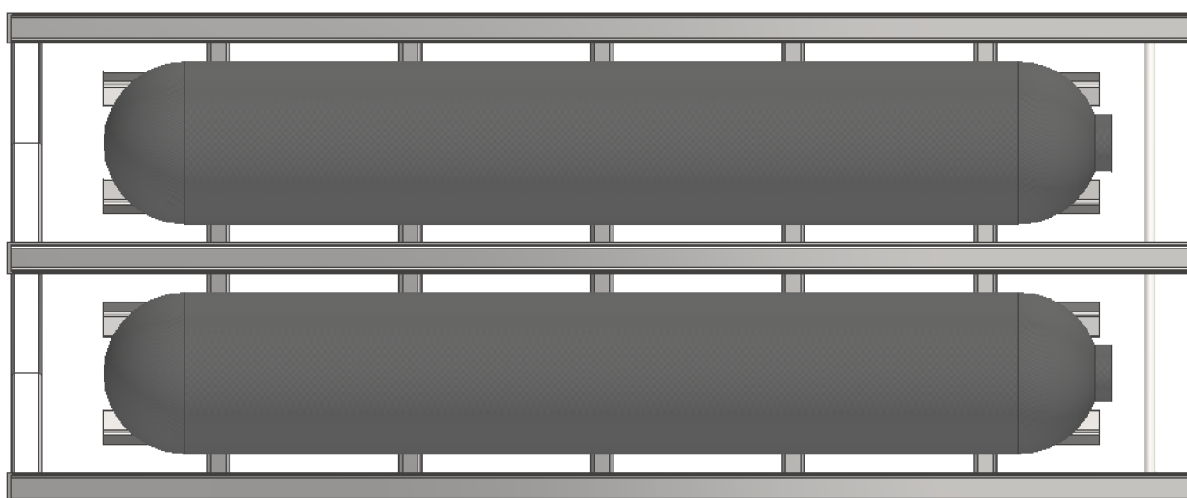
| Profil | Použité množství [m] | Výsledná hmotnost [kg] |
|---------------------|----------------------|------------------------|
| Obdélníkový 80x60x5 | 43 | 405 |
| Obdélníkový 60x40x5 | 9 | 58 |
| U profil UE8 | 9 | 64 |
| T profil T 60 A | 1,6 | 10 |



Obr. 22 Přední a zadní pohled na plný Úložný modul



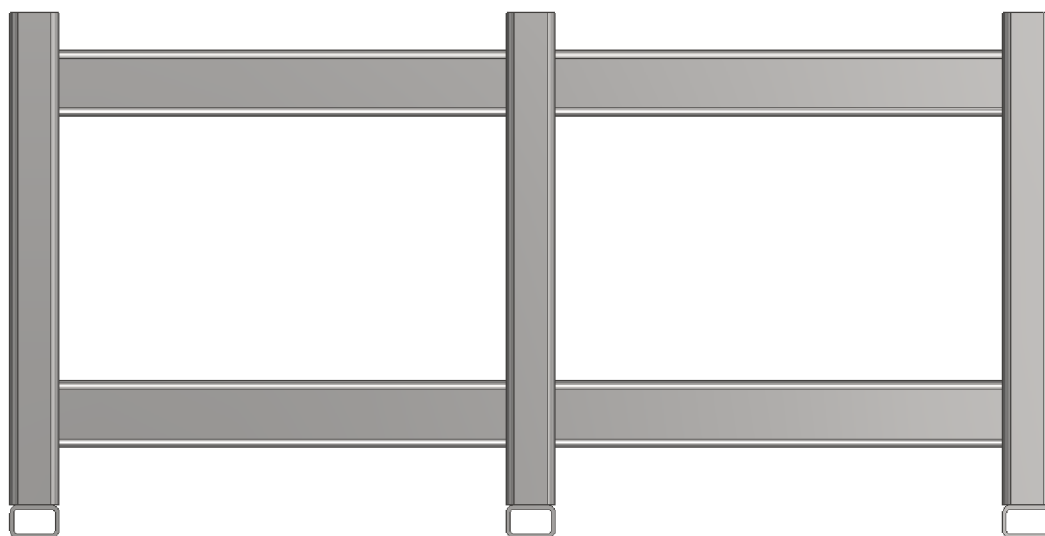
Obr. 23 Boční pohled na Úložný modul s detaily zajištění bezpečnostní tyče a zaslepení U profilu



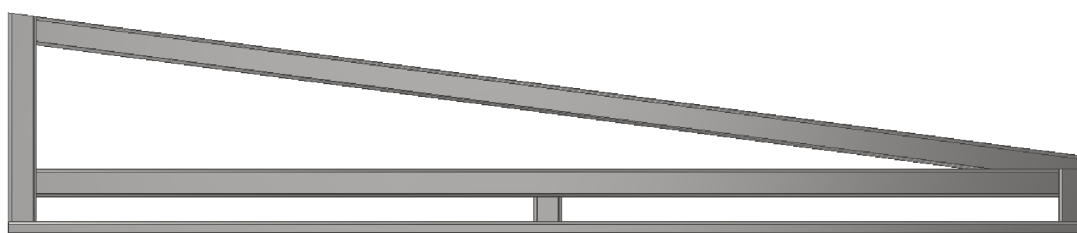
Obr. 24 Horní pohled na plný Úložný modul

5.2 ZASTŘEŠOVACÍ MODUL

Zastřešovací modul je složen z obdélníkových uzavřených profilů 80x60x5 a 60x40x5 dle normy ČSN 42 5720. Na tuto konstrukci může být připevněna libovolná střešní krytina. Dále byla též zvažována možnost uchycení bočních zástěn pro celou sestavu. Mohlo by jít například o silnou nepromokavou vrstvu plachtoviny, která by chránila sestavu před přírodními vlivy. Přední pohled na obrázku 25 by byl touto ochrannou vrstvou také zakryt, a naopak profil bočního pohledu by zůstal odrytý pro zlepšení proudění vzduchu a efektivnějšímu odvodu vodíku v případě jeho úniku. Zakrytím profilu předního pohledu navíc dojde k částečné eliminaci sil vyvolávaných větrem, které by mohli nadzvedávat celý střešní modul.



Obr. 25 Přední pohled na Zastřešovací modul



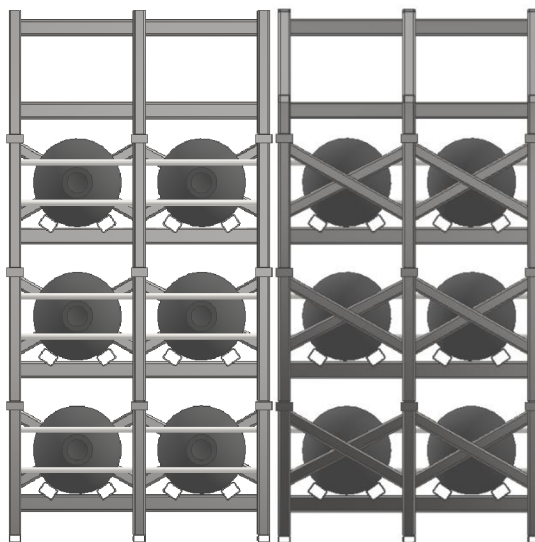
Obr. 26 Boční pohled na Zastřešovací modul

Tab. 15 Použité druhy profilů a jejich množství

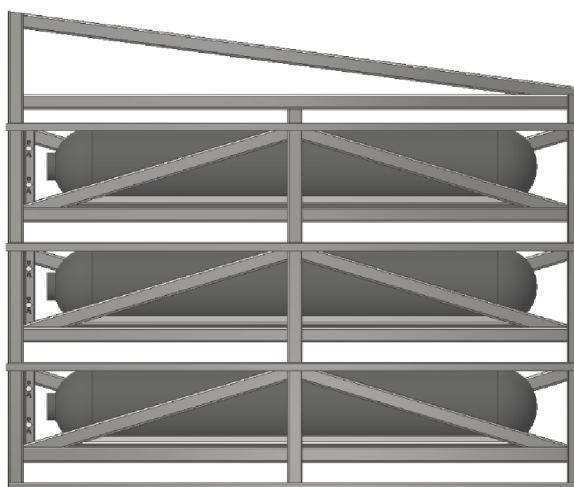
| Profil | Použité množství [m] | Výsledná hmotnost [kg] |
|---------------------|----------------------|------------------------|
| Obdélníkový 80x60x5 | 22 | 207 |
| Obdélníkový 60x40x5 | 9 | 58 |

5.3 SESTAVA

Z důvodu zaručení statické pevnosti a nechtěného zvyšování těžiště je maximální počet na sobě položených Úložných modulů omezen na tři. V této jednotce je tedy možné uložit až 6 tlakových lahví. Pro zlepšení odolnosti proti korozi může být celá konstrukce pozinkována.



Obr. 27 Přední a zadní pohled na sestavu modulů o maximální kapacitě



Obr. 28 Boční pohled na sestavu modulů o maximální kapacitě

Tab. 16 Přibližný cenový odhad jednotlivých modulů

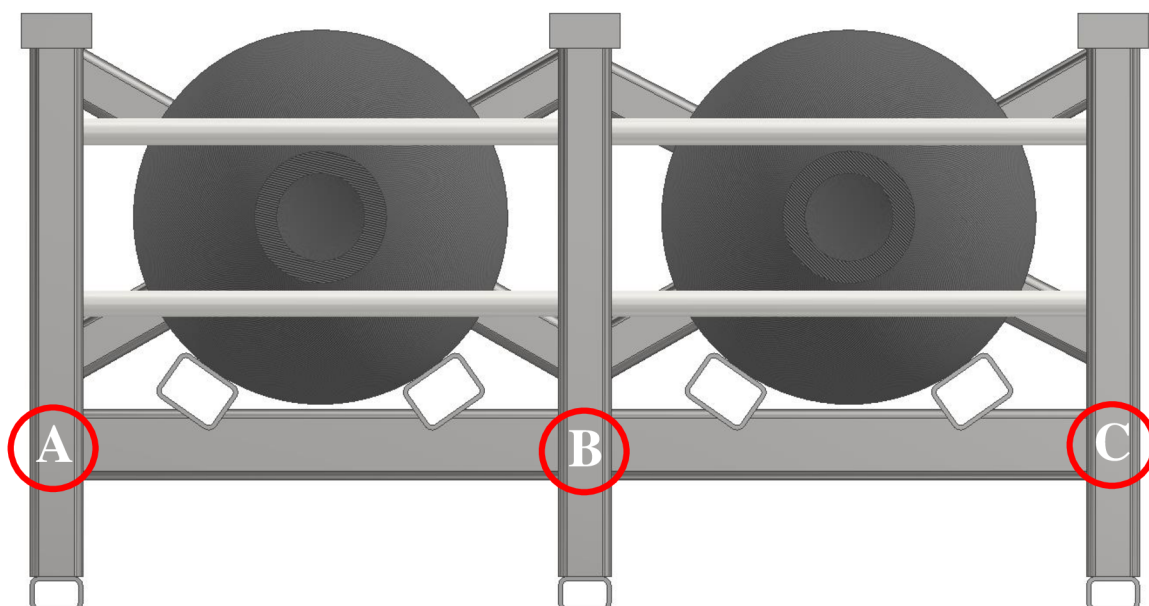
| Modul | Cena [Kč] |
|--------------|-----------|
| Úložný | 25 000 |
| Zastřešovací | 15 000 |

5.4 BEZPEČNOSTNÍ VÝPOČTY

Z bezpečnostního hlediska je nejkritičtější modulem vždy úložný modul spočívající na zemi, na němž leží všechny ostatní moduly včetně lahví. Nejdříve je nutné spočítat která ze tří podpor bude nejvíce zatížena váhou samotných lahví.

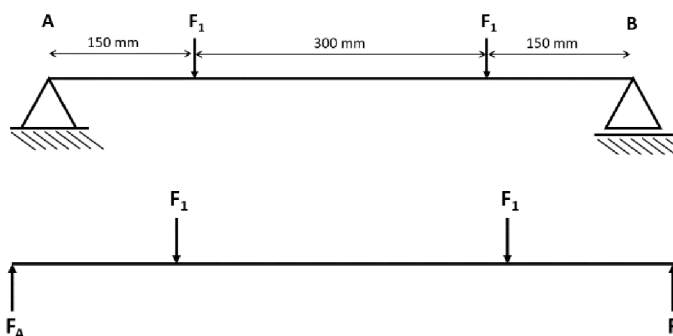
Tab. 17 Hmotnosti jednotlivých modulů

| Komponenta | Značka | Hmotnost [kg] |
|--------------------|----------------|---------------|
| Úložný modul | m _Ú | 536 |
| Střešní modul | m _s | 338 |
| Plná tlaková lahev | m _L | 140 |



Výpočet sil na jednotlivé podpory pouze od zátěže tlakových lahví

$$F_1 = \frac{m_L}{2} * g = \frac{140}{2} * 9,81 = 686,7 \text{ N} \quad (20)$$

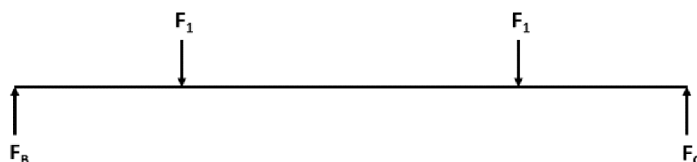


$$\sum F = 0 = F_1 + F_1 - F_A - F_B \quad (21)$$

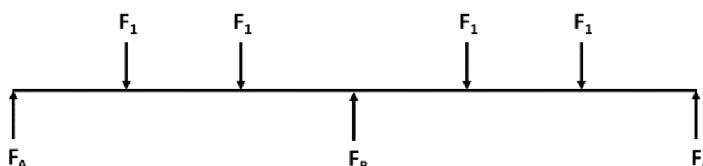
$$\sum M_o = 0 = F_1 * 0,15 + F_1 * (0,15 + 0,3) - F_B * (0,15 + 0,3 * 0,15) \quad (22)$$

$$F_B = \frac{F_1 * 0,15 + F_1 * (0,15 + 0,3)}{0,15 + 0,3 * 0,15} = 686,7 \text{ N} \quad (23)$$

$$F_A = F_1 + F_1 - F_B = 686,7 \text{ N} \quad (24)$$



$$F_C = F_B = F_A \quad (25)$$



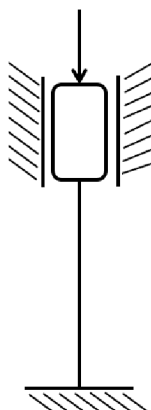
$$2 * F_B = F_A = F_C \quad (26)$$

Podpora B bude tlakovými lahvemi zatěžována 2x více než podpory A a C. Každá z podpor je složena ze 3 vzpěr. Z výpočtu 27 vyplývá síla působící na 1 vzpěru podpory B se zatížením od 6 lahví, 3 úložných modulů a 1 střešního modulu, kde P znázorňuje rovnoměrnost rozložení zatížení na jednotlivé podpory a V znázorňuje počet vzpěr na které je zatížení rozloženo.

$$F_{max} = \left(\frac{3 * m_U + m_S}{P * V} + \frac{6 * m_L}{P * V} \right) * g = \left(\frac{3 * 536 + 338}{3 * 3} + \frac{6 * 140}{2 * 3} \right) * 9,81 = 3\,494,54 \text{ N} \quad (27)$$

Vzpěrná stabilita

Při zatížení prutu na tlak je nutné ověřit vzpěrnou stabilitu. Bylo zvoleno následující modelové uložení vzpěry z důvodu navýšení bezpečnosti výpočtu, koeficient α tedy bude 2π . Youngův modul pružnosti byl zvolen **207 GPa** [55], minimální kvadratický moment průřezu je dle ČSN EN 10219-2 **65,7 cm⁴**, délka uvažované vzpěry je **600 mm**.



$$F_{krit} = \frac{\alpha^2 * E * I_{min}}{L^2} = \frac{2\pi^2 * 207 * 10^9 * 6,57 * 10^{-7}}{0,6^2} = 14,913 \text{ MN} \quad (28)$$

Štíhlost

Poloměr setrvačnosti uzavřeného obdélníkového profilu je dle normy ČSN EN 10219-2 **i = 23,1 mm**. Z následujícího výpočtu je vypočtena štíhlost vzpěry.

$$\lambda = \frac{L}{i} = \frac{600}{23,1} = 25,97 \quad (29)$$

Vzhledem k vysoké kritické síle a k velmi nízké štíhlosti bylo usouzeno, že dříve, než dojde ke ztrátě vzpěrné stability dojde k porušení vlivem překročení mezního napětí v tlaku.

Napětí v tlaku

Podle následujících výpočtů je zjištěn bezpečnostní koeficient vzhledem k tomu, že mez kluzu je dle normy ČSN 41 1353 **Re=235 MPa** a plocha průřezu profilu je dle normy ČSN EN 10219-2 **12,4 cm²**.

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S} = \frac{3\,494,54}{12,4 * 10^{-4}} = 2,818 \text{ MPa} \quad (30)$$

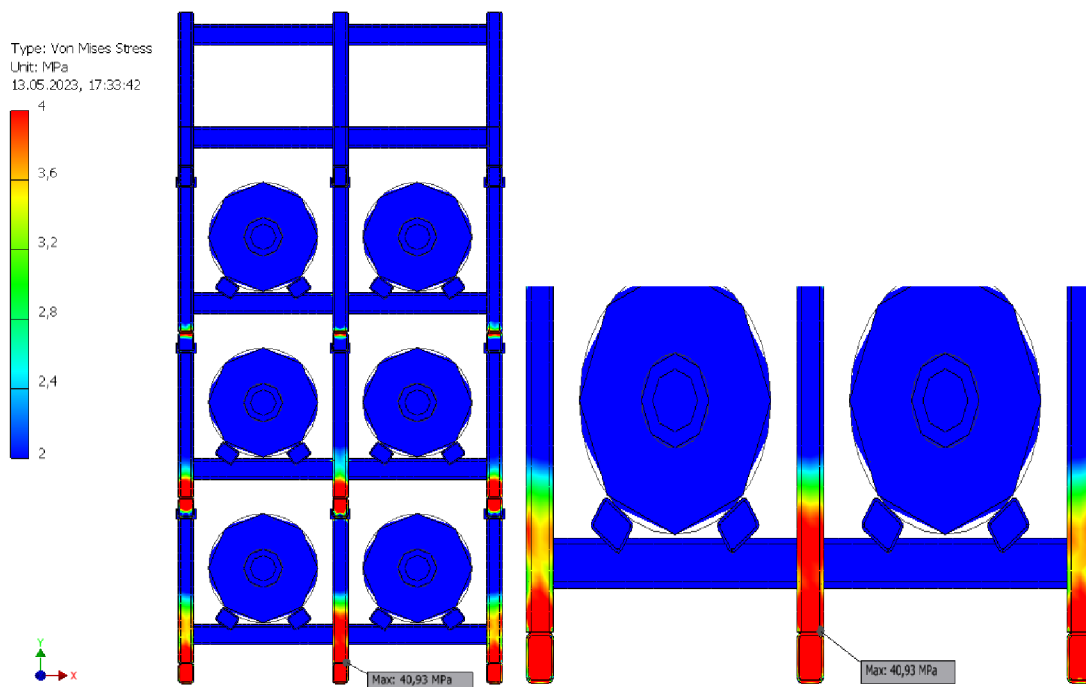
$$k = \frac{Re}{\sigma} = \frac{235}{2,818} = 83,38 \quad (31)$$

Zhodnocení výpočtů

Výše zmíněné výpočty vycházejí z předpokladu dokonale tuhých prutů. Nejvýznamnější odchylkou tohoto předpokladu je fakt, že zatížení v rámci jedné podpory ve skutečnosti nebude rozloženo rovnoměrně ale kvůli průhybu bude nejvíce zatížena střední vzpěra. Významná část zatížení tak bude spočívat na středním 60x40x5 profilu v místě kde je spojen se střední vzpěrou. Pro ověření této bezpečnosti byla provedena následující simulace v programu Inventor.

MKP

Napětí bylo v tomto místě programem Inventor 2023 vypočítáno na 40,98 MPa a bezpečnost na 5,05. Vzhledem k tomu, že simulace počítá s dokonalými součástmi tak se dá předpokládat, že skutečná bezpečnost bude o ještě nižší. Proto není vhodné aby na sobě byli naskládány více než 3 Úložné moduly.



Obr. 29 Analýza napětí v programu Inventor 2023

6 ZÁVĚR

Prvním cílem této práce bylo zhodnocení ekologičnosti různých způsobů výroby vodíku. Jako jediná skutečně ekologická metoda byla vyhodnocena varianta zeleného vodíku vyráběného elektrolýzou vody poháněnou energií z obnovitelných zdrojů. Za zvážení potom stojí i fialový vodík, který může být použit jako přechodová varianta do doby, než se přejde na čistě zelený vodík. Fialový vodík je vyráběný elektrolýzou vody poháněnou energií získanou z jaderných elektráren - tato varianta je aktivně rozvíjena například v Japonsku jako alternativa k modrému vodíku, který je rozvíjen v evropských zemích a ve Spojených Státech Amerických. Modrý vodík se však zdá být, podle dostupných dat, pouhou ekologickou zástěrkou těžařských společností. Modrý vodík je totiž vyráběn ze zemního plynu a při jeho výrobě jsou použita zařízení pro zachycení CO₂ unikajícího do ovzduší. Pro pohon těchto zařízení je však nutné spálit další zemní plyn, jehož emise CO₂ už nejsou nijak regulovány. Ve výsledku tak dochází pouze k malému poklesu emisí CO₂, a to při použití většího množství zemního plynu pro výrobu 1 kg vodíku. Další slibnou ekologickou variantou je biovodík vyráběný z biomasy.

Na základě řady parametrů byli posouzeny různé metody uskladnění vodíku. Prvním posuzovaným přístupem bylo stlačení plynného vodíku v tlakových lahvích. Tato metoda je vhodná pro přepravu menších a středních množství vodíku a pro jeho dlouhodobé uskladnění. Při zaručení stabilní teploty je totiž možné uskladnit takto vodík po téměř neomezeně dlouhou dobu bez výskytu časově závislých ztrát. Zkapalněný vodík je vhodný pro krátkodobé uložení a k přepravě většího množství; není vhodný jako dlouhodobé úložiště pro své neustálé ztráty způsobené nedokonalou tepelnou izolací extrémně podchlazeného vodíku. Metalhydráty je potom vhodné použít výhradně jako stacionární úložiště. Využití amoniaku jako nosiče vodíku je vhodné spíše pro pouhou přepravu vodíku, vhodnější by však bylo jeho využití přímo jako paliva. Pro použití v akumulacím systému energie je pak vhodné využití metalhydrátů v aplikacích kdy je potřeba uložit menší množství energie a stlačeného vodíku v aplikacích vyžadujících větší energetickou kapacitu. Metalhydráty nejsou pro uchování velkých objemů vodíku vhodné pro svoji vysokou hmotnost a cenu. Z bezpečnostního hlediska jsou však nejvhodnější variantou právě metalhydráty, jelikož při jejich použití se nevyužívá extrémních tlaků ani teplot. Vodík navíc v metalhydrátech není uchováván ve své (potencionálně nebezpečné) čisté formě.

Při porovnávání vodíkových a bateriových akumulátorů vystávají dva hlavní rozdíly, prvním jsou několikanásobně vyšší ztráty vodíkového systému, druhým je potom několikanásobně vyšší cena baterií za uchovanou kWh energie. Bateriová úložiště však představují z bezpečnostního hlediska menší riziko. Za potenciální výhody vodíku mohou být považovány možnosti ohřívání vody a možnost odebírání samotného čistého vodíku. V případě použití v areálu FSI může být takovýto čistý vodík využíván například ve výuce předmětů zaměřených na vodíkové systémy. Značnou výhodou bateriových akumulátorů je však fakt, že by k jejich efektivnímu provozu stačil pouhý zlomek výkonu současných fotovoltaických panelů, bez nutnosti jakékoliv modernizace a dodatečných nákladů. Vzhledem k tomu, že se v následujících letech očekává postupný pokles ceny bateriových akumulátorů se zdá, že v budoucnu budou bateriové akumulátory čím dál výhodnější i z ekonomického hlediska. Avšak dokud budou baterie trpět samovybíjením tak vodíková úložiště budou vhodnější alternativou například v provedení záložních zdrojů energie, kdy vodík může být téměř neomezeně dlouhou dobu beze ztrát uložen a až v případě potřeby spotřebován.

7 BIBLIOGRAFIE

- [1] GAVRILYUK, Alexander. *Hydrogen energy for beginners*. Singapore: Pan Stanford, 2014, xv, 328 s. ISBN 978-981-4364-77-5.
- [2] DAWOOD, Furat, Martin ANDA a G.M. SHAFIULLAH. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020, **45**(7), 3847-3869. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.059
- [3] *Hydrogen In Industrial Applications* [online]. Washington, USA: FCHEA, 2020 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.fchea.org/hydrogen-in-industrial-applications>
- [4] *Hydrogen: Energy system overview* [online]. Paris: IEA, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
- [5] AJANOVIC, A., M. SAYER a R. HAAS. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022, **47**(57), 24136-24154. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.02.094
- [6] *Understanding Global Warming Potentials* [online]. USA: EPA, 2022 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [7] *Global Greenhouse Gas Emissions Data* [online]. USA: EPA, 2020 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
- [8] *Overview of Greenhouse Gases* [online]. USA: EPA, 2020 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#CO2-references>
- [9] HOWARTH, Robert W. a Mark Z. JACOBSON. How green is blue hydrogen?. *Energy Science and Engineering*. 2021, **9**(10), 1676-1687. ISSN 2050-0505. Dostupné z: doi:10.1002/ese3.956
- [10] *Should it be called “natural gas” or “methane”?* [online]. Yale university, New Haven, USA: Yale Program on Climate Change Communication, 2020 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://climatecommunication.yale.edu/publications/should-it-be-called-natural-gas-or-methane/>
- [11] LEPAGE, Thibaut, Maroua KAMMOUN, Quentin SCHMETZ a Aurore RICHEL. Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2021, **2021**(144), - [cit. 2023-04-01]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2020.105920
- [12] BOUDELLAL, Dr. Méziane. *Power-to-Gas*. Balma (Francie): Walter de Gruyter

- GmbH, 2018. ISBN 978-3-11-055881-4.
- [13] LANGMI, Henrietta W., Nicolaas ENGELBRECHT, Phillimon M. MODISHA a Dmitri BESSARABOV. Hydrogen storage: Fundamentals, Systems, and Applications. In: *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Fundamentals, Systems, and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2022, s. 455-486. ISBN 9780128194249. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-819424-9.00006-9
- [14] *BEZPEČNOSTNÍ LIST Amoniak, (čpavek) bezvodý*. Verze 2.1. Praha: Linde Gas a.s., 2013, 129 s. Dostupné také z: https://www.linde-gas.cz/cs/images/Amoniak_tcm79-632304.pdf
- [15] SANKIR, Mehmet a Nurdan Demirci SANKIR. *Hydrogen Storage Technologies*. Hoboken (USA): John Wiley and Sons, 2018, 352 s. ISBN 978-1-119-45988-0.
- [16] Linde standard hydrogen filling station with IC90 compressor. In: *YouTube* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=usaQrCDORFY&ab_channel=Linde
- [17] *IC90/30 Ionic Compressor: Compressor module for gaseous hydrogen refueling station* [online]. In: . Vídeň: Linde Hydrogen FuelTech GmbH, s. 1 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: https://www.linde-engineering.com/en/images/LE_LHRT_datasheet_IC90_30_Ionic_Compressor_tcm19-634422.pdf
- [18] SHERIF, S.A., D. Yogi GOSWAMI, Elias K. STEFANAKOS a Aldo STEINFELD, ed. TAYLOR & FRANCIS GROUP. *Handbook of Hydrogen Energy*. New York: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4200-5447-7.
- [19] JAKUBEC, Matěj. DEVINN. *Konzultace*. Microsoft Teams, 2023.
- [20] Iron and Steel Technology Roadmap. In: *IEA - International Energy Agency* [online]. IEA, 2020 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- [21] Green Steel production. In: *H2 green steel* [online]. H2 green steel, 2022 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.h2greensteel.com/articles/green-steel-production>
- [22] *H2 green steel* [online]. Stockholm: H2 green steel, 2022 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.h2greensteel.com/>
- [23] *LAVO* [online]. Austrálie: LAVO, 2023 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.lavo.com.au/>
- [24] LAVO: Hydrogen Battery Secure Backup Power Commercial Residential. In: *H2 Networks: Hydrogen solutions* [online]. Austrálie [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.h2networks.com.au/lavo-hydrogen-battery/>

- [25] WAN, Zhijian, Youkun TAO, Jing SHAO, Yinghui ZHANG a Hengzhi YOU. Ammonia as an effective hydrogen carrier and a clean fuel for solid oxide fuel cells. In: *Energy Conversion and Management* [online]. 2021, [cit. 2023-04-07]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2020.113729
- [26] SASAKI, Kazunari, Hai-Wen LI, Akari HAYASHI, Junichiro YAMABE, Teppei OGIURA a Stephen M. LYTH, ed. *Hydrogen Energy Engineering: A Japanese Perspective*. Japonsko: Springer Japan, 2016. ISBN 978-4-431-56040-1.
- [27] Ammonia—a renewable fuel made from sun, air, and water—could power the globe without carbon. In: *Science* [online]. Portland (Oregon): AAAS [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.science.org/content/article/ammonia-renewable-fuel-made-sun-air-and-water-could-power-globe-without-carbon>
- [28] VERKAMP, F.J., M.C. HARDIN a J.R. WILLIAMS. Ammonia combustion properties and performance in gas-turbine burners. In: *Symposium (International) on Combustion*. Elsevier Inc., 1967, , s. 985-992. ISSN 00820784. Dostupné z: doi:10.1016/S0082-0784(67)80225-X
- [29] OKONKWO, Paul C., El Manaa BARHOUMI, Ikram BEN BELGACEM et al. A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process. In: *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2023, , s. 12935-12948 [cit. 2023-04-07]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.12.252
- [30] Energetika. In: *Fakta o klimatu* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/temata/energetika#mix>
- [31] GROTE, Karl-Heinrich a Hamid HEFAZI, ed. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. 2nd Edition. Švýcarsko: Springer, 2021. ISBN 978-3-030-47035-0.
- [32] *How Energy Use Varies with the Seasons* [online]. In: . [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://learn.pjm.com/three-priorities/keeping-the-lights-on/how-energy-use-varies>
- [33] HOURLY ELECTRIC GRID MONITOR. In: *EIA U.S. Energy Information Administration* [online]. 2020 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://www.eia.gov/electricity/gridmonitor/expanded-view/electric_overview/US48/US48/GenerationByEnergySource-4
- [34] SUNDÉN, Bengt. *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells* [online]. Academic Press, 2019 [cit. 2023-04-07]. ISBN 978-0-12-816950-6.
- [35] SHIVA KUMAR, S. a Hankwon LIM. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports* [online]. 2022, **8**, 13793-13813 [cit. 2023-04-09]. ISSN 23524847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egyr.2022.10.127
- [36] LAMY, Claude. From hydrogen production by water electrolysis to its utilization in a PEM fuel cell or in a SO fuel cell: Some considerations on the energy efficiencies. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2016, **41**(34), 15415-15425 [cit.

- 2023-04-09]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2016.04.173
- [37] HUANG, Zhenyu, Jun SHEN, Siew Hwa CHAN a Zhengkai TU. Transient response of performance in a proton exchange membrane fuel cell under dynamic loading. *Energy Conversion and Management* [online]. 2020, **226** [cit. 2023-04-09]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2020.113492
- [38] *How much CO2 is emitted by manufacturing batteries?* [online]. MIT Climate Portal, 2022 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-co2-emitted-manufacturing-batteries>
- [39] Cobalt. In: *Center for Disease Control and Prevention* [online]. U.S. Department of Health & Human Services [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/cobalt/default.html#:~:text=It%20can%20harm%20the%20eyes,duration%2C%20and%20work%20being%20done>.
- [40] GARSIDE, M. Major countries in worldwide cobalt mine production in 2022. In: *Statista* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/264928/cobalt-mine-production-by-country/#:~:text=The%20mining%20industry%20in%20the,producer%20by%20a%20large%20margin>.
- [41] Industry giants fail to tackle child labour allegations in cobalt battery supply chains. In: *Amnesty International* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.amnesty.org/en/latest/press-release/2017/11/industry-giants-fail-to-tackle-child-labour-allegations-in-cobalt-battery-supply-chains/>
- [42] COBALT MINING IN THE DEMOCRATIC REPUBLIC OF THE CONGO: ADDRESSING ROOT CAUSES OF HUMAN RIGHTS ABUSES. In: *Geneva Center for Business and Human Rights* [online]. Ženeva (Švicarsko): Geneva School of Economics and Management [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://gcbhr.org/insights/2023/02/cobalt-mining-in-the-democratic-republic-of-the-congo-addressing-root-causes-of-human-rights-abuses>
- [43] PHASE 5: RECYCLING AND DISPOSAL. In: *Cobalt Institute* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: https://www.cobaltinstitute.org/divi_overlay/phase-5-recycling-and-disposal/#:~:text=Cobalt%20is%20endlessly%20recyclable%20in,back%20into%20the%20supply%20chain.
- [44] Cobalt Mining. In: *Cobalt Institute* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/cobalt-life-cycle/cobalt-mining/>
- [45] ŠIMKOVÁ, Bc. Nikola. *ENERGETICKÉ ZÁSBOVÁNÍ AREÁLU TECHNICKÁ 2*. Brno, 2022. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Marian Brázdil, Ph.D.
- [46] KEÇEBAŞ, Ali, Muhammet KAYFECİ a Mutlucan BAYAT. Electrochemical hydrogen generation. In: *Solar Hydrogen Production* [online]. Elsevier, 2019, s. 299-317 [cit. 2023-04-09]. ISBN 9780128148532. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-814853-

2.00009-6

- [47] *AEM Electrolyser: EL 4.0* [online]. Pátá revize. Enapter, 2 s. [cit. 8.4.2023]. Dostupné z: https://handbook.enapter.com/electrolyser/el40/downloads/Enapter_Datasheet_EL40_EN.pdf
- [48] *H2 BASE: MOBILE ENERGY SOURCE USING HYDROGEN FUEL CELL*. Jablonec n. Nisou: DEVINN s.r.o., 2021. Dostupné také z: https://uploads-ssl.webflow.com/6169649791963784c660837f/63496ad960a2df0ea9013a22_Datasheet_H2BASE_ENG.pdf
- [49] *H2BASE: hydrogen energy generator* [online]. In: . DEVINN s.r.o. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://en.devinn.cz/produkty/h2base#CenterCTAScroll1>
- [50] *350 BAR HYDROGEN Brochure* [online]. In: . s. 2 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://www.hannovermesse.de/apollo/hannover_messe_2021/obs/Binary/A1089958/Steelhead%20Composites%20350%20Bar%20Hydrogen%20Brochure.pdf
- [51] MOORE, Timothy, Lowe SADDLER, ed. How Much Does The Tesla Powerwall Solar Battery Cost?. In: *Forbes: Home* [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/tesla-powerwall-solar-battery-review/>
- [52] Battery Storage Knowledge Bank: Tesla Powerwall 2. In: *Spirit Energy* [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.spiritenergy.co.uk/tesla-battery-solar#:~:text=Tesla's%20warranty%20guarantees%20unlimited%20cycles,provide%2010.8kWh%20of%20capacity.>
- [53] Elektřina - ceny a grafy elektřiny, vývoj ceny elektřiny 1 MWh - 1 rok - měna CZK. In: *Kurzy* [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektřiny-graf-vyvoje-ceny/1MWh-czk-1-rok>
- [54] AGOSTINI, Alessandro, Nadia BELMONTE, Alessio MASALA et al. Role of hydrogen tanks in the life cycle assessment of fuel cell-based auxiliary power units. *Applied Energy* [online]. 2018, **215**, 1-12 [cit. 2023-05-17]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.01.095
- [55] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|---------------------|---------------------|--|
| AC | | Střídavý proud |
| AEM | | Anion Exchange Membrane |
| CCS | | Combined Charging System (Evropský standard) |
| CO _{2eq} | [g] | Ekvivalentní množství CO ₂ odpovídající stejnému znečištění |
| DC | | Stejnoseměrný proud |
| DRK | | Demokratická republika Kongo |
| E | [Pa] | Youngův modul pružnosti |
| E _Δ | [J] | Měsíční přírůstek/úbytek energie |
| E→H ₂ | [J/kg] | Energie potřebná pro výrobu 1 kg vodíku |
| E _{in} | [J] | Měsíční výroba energie |
| E _{inλ} | [J] | Měsíční výroba energie se ztrátami |
| E _{out} | [J] | Měsíční spotřeba energie |
| E _{outλ} | [J] | Měsíční spotřeba energie se ztrátami |
| E _{ZTRÁTY} | [J] | Ztracená energie |
| F ₁ | [N] | Poloviční tíhová síla od tlakové lahve |
| F _A | [N] | Síla působící na podstavu A od tlakové lahve |
| F _B | [N] | Síla působící na podstavu B od tlakové lahve |
| F _C | [N] | Síla působící na podstavu C od tlakové lahve |
| F _{krit} | [N] | Síla, při které dojde ke ztrátě vzpěru |
| F _{max} | [N] | Maximální vypočítaná síla působící na vzpěru |
| g | [m/s ²] | Tíhové zrychlení |
| GWP | | Global Warming Potential (vliv daného plynu na globální oteplování) |
| H _{2Δ} | [kg] | Změna množství vodíku |
| H _{2→E} | [J/kg] | Energie získaná z 1 kg vodíku |
| H _{2in} | [kg] | Hmotnost vyrobeného vodíku |
| H _{2LAHEV} | [kg] | Kapacita jedné lahve |
| H _{2M1} | [kg] | Množství vodíku v nádrži v měsíci 1 |
| H _{2M2} | [kg] | Množství vodíku v nádrži v měsíci 2 |
| H _{2MAX} | [kg] | Maximum uloženého vodíku |
| H _{2out} | [kg] | Hmotnost spotřebovaného vodíku |
| CHAdE MO | | Charge de Move (Japonský standard) |
| i | [m] | Poloměr setrvačnosti |

| | | |
|------------|-------------------|---|
| I_{\min} | [m ⁴] | Minimální kvadratický moment |
| k | [-] | Bezpečnostní koeficient |
| L | [m] | Uvažovaná délka vzpěry |
| MKP | | Metoda konečných prvků |
| m_L | [kg] | Plná tlaková lahev |
| m_s | [kg] | Střešní modul |
| m_u | [kg] | Úložný modul |
| P | [-] | Rovnoměrnost rozložení zatížení na jednotlivé podpory |
| PEM | | Proton Exchange Membrane |
| Re | [Pa] | Mez kluzu |
| S | [m ²] | Plocha průřezu vzpěry |
| V | [-] | Počet vzpěr, na které je zatížení rozloženo |
| X | [-] | Počet nabíjených elektromobilů |
| Y | [-] | Počet lahví |
| α | [-] | Koeficient uložení vzpěry |
| λ | [-] | Štíhlost |
| σ | [Pa] | Napětí ve vzpěře |

SEZNAM PŘÍLOH